

Н. П. ЕРМОЛИН и А. П. ВАГАНОВ

**РАСЧЕТ
МАЛОМОЩНЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ**



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Н. П. ЕРМОЛИН и А. П. ВАГАНОВ

РАСЧЕТ МАЛОМОЩНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

*ПОД РЕДАКЦИЕЙ
доктора технических наук,
профессора
Н. П. ЕРМОЛИНА*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1957 ЛЕНИНГРАД



В книге излагается систематизированный расчет маломощных силовых трансформаторов, автотрансформаторов, пиковых и импульсных трансформаторов. Приводятся числовые примеры расчета.

Книга предназначена для инженеров и техников, занятых в области производства маломощных трансформаторов и в области проектирования радиоприемных, радиопередающих и автоматических устройств. Она может также быть полезна студентам вузов и техникумов соответствующих специальностей.

Авторы: *Ермолин Николай Пантелеймонович*
и *Ваганов Александр Петрович*

„Расчет маломощных трансформаторов“

Редактор *Н. И. Андреев*
Технический редактор *А. А. Забродина*

Сдано в производство 16/II 1957 г. Подписано к печати 4/V 1957 г.
М-13273. Печ. л. 9. Бум. л. 4,5. Уч.-изд. л. 8. 60×92¹/₁₆.
Тираж 15 000. Заказ 451. Цена 4 р.

Типография № 2 Управления культуры Ленгорисполкома
Ленинград, Социалистическая, 14

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в многочисленных современных радиоустройствах, в различных схемах с электронными и ионными приборами и в ряде автоматических установок для управления и регулирования производственными процессами и исполнительными механизмами широкое применение получили маломощные силовые однофазные и трехфазные трансформаторы и автотрансформаторы в диапазоне мощностей от нескольких единиц до нескольких сотен вольтампер и специальные пиковые и импульсные трансформаторы малой мощности.

Автотрансформатор отличается от трансформатора тем, что он имеет одну обмотку, часть которой одновременно принадлежит первичной и вторичной цепям (см. рис. 20). Основным назначением маломощных силовых трансформаторов и автотрансформаторов в указанных радио- и электронных устройствах является питание накальных и анодных цепей и других элементов этих устройств.

Под пиковым трансформатором понимается специальный тип трансформатора, который служит для преобразования первичного напряжения синусоидальной формы во вторичное напряжение с крутым фронтом волны в виде пика (см. рис. 24—27). Эти трансформаторы получили практическое применение в установках с тиратронами и ртутными выпрямителями, снабженными регулируемыми сетками. Их назначением является зажигание этих приборов и регулирование величины выпрямляемого приборами тока.

Импульсный трансформатор также представляет собой специальный тип трансформатора, который служит для трансформации кратковременных импульсов напряжения приблизительно прямоугольной формы длительностью порядка 1—2 микросекунды и меньше, периодически повторяющихся с частотой примерно 500—2000 гц. Эти трансформаторы находят широкое

применение в технике радиолокации, телевидения и импульсной радиосвязи. С помощью их в этих областях техники осуществляется повышение амплитуды импульса напряжения, изменение полярности импульса и межкаскадная связь в усилителях.

Расчет маломощных силовых трансформаторов и автотрансформаторов в указанном диапазоне мощностей, в особенности расчет пиковых и импульсных трансформаторов, отличается от порядка расчета обыкновенных трансформаторов большой мощности. Если по расчету последних имеется ряд книг, изданных в разное время, то по расчету маломощных силовых трансформаторов и автотрансформаторов, особенно пиковых и импульсных трансформаторов, систематическая литература недостаточна. В связи с этим настоящая книга имеет своей целью дать систематизированный расчет маломощных силовых однофазных и трехфазных трансформаторов и автотрансформаторов в диапазоне мощностей от нескольких единиц до нескольких сотен вольтампер и специальных пиковых и импульсных трансформаторов малой мощности.

Книга предназначена в качестве учебного руководства для электротехнических и политехнических высших учебных заведений с радиотехническими, электровакуумными и электроприборостроительными факультетами. Книга может быть также полезной при проектировании маломощных трансформаторов инженерами предприятий и организаций, занимающихся производством этих трансформаторов.

Отдельные части книги распределяются между авторами следующим образом: Н. П. Ермолиным написаны введение, третья и четвертая главы, А. П. Вагановым — первая и вторая главы.

МАЛОМОЩНЫЕ СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Проектирование трансформаторов складывается из расчета и конструирования их. Расчет трансформатора в общем представляет собой математически неопределенную задачу со многими решениями, так как число определяемых неизвестных больше числа уравнений, связывающих их. Вследствие этого в процессе расчета трансформатора приходится задаваться определенными значениями некоторых исходных электромагнитных и конструктивных величин, базируясь на опыте построенных трансформаторов. В связи с этим при проектировании нового трансформатора обычно получается несколько расчетных вариантов его, из которых и выбирается наивыгоднейший.

Расчет маломощных силовых трансформаторов в диапазоне мощностей от нескольких единиц до нескольких сотен вольт-ампер в принципе мало отличается от расчета силовых трансформаторов большой мощности, но вместе с тем имеет некоторые особенности в отношении определения первичного тока, выбора индукции, падения напряжения в обмотках и др.

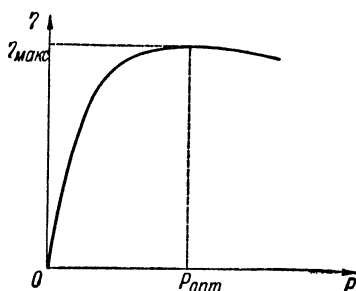
Для правильного выбора окончательного варианта проектируемого трансформатора необходимо иметь в виду связь между стоимостью трансформатора и величиной его к. п. д.

Расчет и опыт показывают, что можно рассчитать и построить трансформатор с весьма высоким к. п. д., однако это не является еще признаком наивыгоднейшего варианта трансформатора, так как при выборе его нужно учитывать также и другие технико-экономические показатели, как, например, размеры, вес и стоимость трансформатора. Уменьшение веса и стоимости трансформатора связано с увеличением индукции в сердечнике и плотности тока в обмотках, что ведет к увеличению потерь в стали и меди трансформатора, а следовательно, к повышению нагрева его. При этом к. п. д. трансформатора уменьшается.

Предельно допустимый нагрев маломощных трансформаторов для обычной изоляции обмоток класса А может составлять

100—110° С или превышать температуру окружающей среды на 65—75° С при температуре этой среды 35° С. Следовательно, пределом использования активных материалов является нагрев трансформаторов. К. п. д. трансформатора в зависимости от мощности представляет собой кривую, имеющую максимум при определенной нагрузке (рис. 1).

Условия, при которых к. п. д. маломощных трансформаторов получается наибольшим, определяются из уравнения



$$\frac{d\eta}{dP_1} = 0.$$

Величина к. п. д. для маломощных трансформаторов в случае $\cos \varphi_2 = 1$ может быть представлена уравнением

$$\eta = \frac{P_1 - I_\mu^2 r_1 - \left(\frac{P_1}{U_1}\right)^2 r_k - P_c}{P_1};$$

Рис. 1. К. п. д. трансформатора в зависимости от нагрузки

из $\frac{d\eta}{dP_1} = 0$ получается:

$$I_\mu^2 r_1 + P_c = \left(\frac{P_1}{U_1}\right)^2 r_k;$$

где

I_μ — намагничивающий ток трансформатора:

$$I_\mu \approx \sqrt{I_1^2 - I_{1a}^2},$$

r_k — активное сопротивление короткого замыкания обмоток трансформатора:

$$r_k = r_1 + r'_2 = r_1 + r_2 \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2;$$

P_c — потери в стали сердечника его;

P_1 — потребляемая трансформатором мощность из сети;

$I_\mu^2 r_1 + P_c$ — потери в трансформаторе, не зависящие от нагрузки;

$\left(\frac{P_1}{U_1}\right)^2 r_k$ — потери, зависящие от нагрузки.

Таким образом, к. п. д. маломощного трансформатора получается максимальным при равенстве переменных и постоянных потерь в нем. Так как величина I_μ по условиям уменьшения стоимости в маломощных трансформаторах допускается

до 40—50% от I_{1a} , к. п. д. этих трансформаторов получается максимальным при условии, когда

$$P_c \approx (0,75 \div 0,80) P_m.$$

Следовательно, при расчете маломощных силовых трансформаторов, работающих приблизительно при номинальных нагрузках, следует стремиться к отношению

$$\beta = \frac{P_m}{P_c} = 1,25 \div 1,35.$$

В большинстве случаев маломощные силовые трансформаторы являются встроенной частью различных аппаратов и устройств и нередко работают при окружающей температуре 50—60°С вместо 35°С по нормам. Последнее обстоятельство должно учитываться при определении предельной допускаемой температуры нагрева обмоток.

Маломощные силовые трансформаторы обычно строятся однофазными, однако в ряде случаев встречаются также и трехфазные трансформаторы. Эти трансформаторы имеют обычно естественное воздушное охлаждение. Нормальный срок амортизации маломощных силовых трансформаторов, благодаря быстрому „моральному“ и физическому износу аппаратуры, частью которой они являются, значительно меньше, чем для электрических машин и трансформаторов большой мощности. В соответствии с уменьшенным сроком амортизации следует при проектировании маломощных силовых трансформаторов стремиться к уменьшению их стоимости путем максимального использования активных материалов и упрощения их конструкции.

Как известно, в трансформаторах вес стали сердечника и вес меди обмоток находятся во взаимно обратной зависимости, т. е. при увеличении веса активной стали расход меди на обмотки уменьшается. Так как цена обмоточной меди в маломощных трансформаторах значительно выше стоимости стали, то отношение веса стали к весу меди в них делают выше, чем для трансформаторов большой мощности. Маломощные силовые трансформаторы, рассчитанные на минимум стоимости, обычно имеют $\frac{G_c}{G_m} = 4,5 \div 5,5$. Трансформаторы минимального веса имеют $\frac{G_c}{G_m} = 2 \div 3$.

Таким образом, в связи с вышеизложенным, правильно рассчитанный маломощный силовой трансформатор должен иметь минимальные стоимость и вес, удовлетворять заданным техническим требованиям и иметь возможно высокий к. п. д.

Типы маломощных силовых трансформаторов. Маломощные силовые трансформаторы строятся:

а) стержневого типа с двумя катушками (рис. 2,а) и с одной катушкой (рис. 2,б);

б) броневое типа (рис. 3).

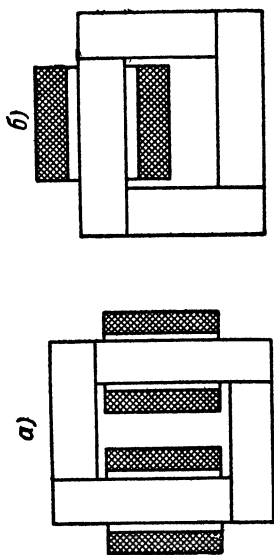


Рис. 2. Трансформаторы стержневого типа: а — с двумя катушками; б — с одной катушкой

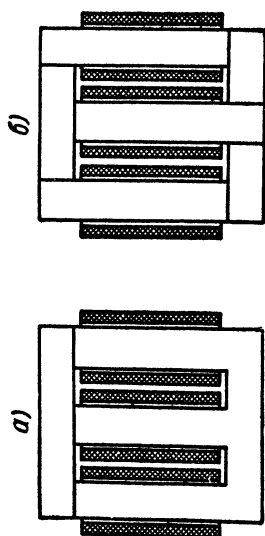


Рис. 4. Трехфазные трансформаторы с различной штамповкой пластин: а — с Ш-образными; б — с прямоугольными пластинами

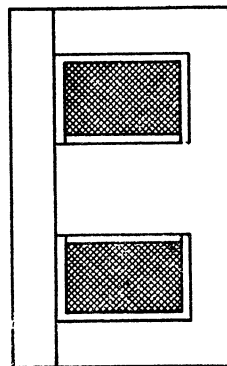


Рис. 3. Трансформатор броневое типа

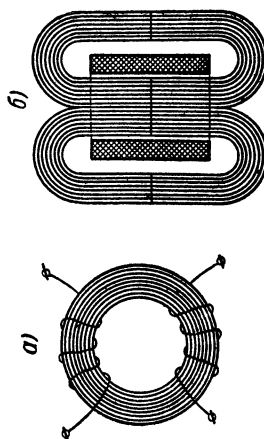


Рис. 5 Трансформаторы с витыми сердечниками: а — тороидальным; б — Ш-образным

Наименьшие вес и стоимость имеют броневого трансформаторы с сердечником из штампованных Ш-образных пластин. Большинство маломощных силовых трансформаторов обычно строится броневого типа. Однако трансформаторы стержневого типа с одной или двумя катушками также находят достаточное применение. Маломощные трансформаторы стержневого типа с двумя катушками имеют лучшее охлаждение и требуют меньшего расхода меди ввиду меньшей средней длины витка и возможной большей плотности тока в обмотках. Трансформаторы стержневого типа с одной катушкой требуют большего расхода меди, но несколько проще в изготовлении.

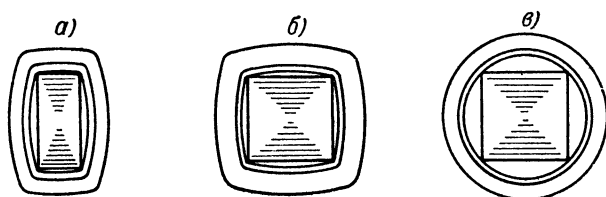


Рис. 6. Формы поперечного сечения стержней и катушек маломощных трансформаторов: а — с прямоугольными катушками; б — с квадратными катушками; в — с круглыми катушками

Трехфазные маломощные силовые трансформаторы выполняются стержневого типа или из штампованных Ш-образных пластин (рис. 4,а), или из прямоугольных пластин (рис. 4,б).

В последнее время в зарубежных странах получили распространение маломощные трансформаторы с тороидальными витыми сердечниками и с Ш-образными витыми разрезными сердечниками (рис. 5,а и б). Витые сердечники маломощных трансформаторов, в особенности выполненные из холоднокатаной стали, имеют более высокую магнитную проводимость потоку, что позволяет несколько повысить индукцию в них и этим уменьшить вес трансформатора.

Форма поперечного сечения стержня и катушек. В маломощных силовых трансформаторах форма поперечного сечения стержня применяется или прямоугольная (рис. 6,а), или квадратная (рис. 6,б и в). В последнем случае катушки делаются или прямоугольной (рис. 6,а), или круглой формы (рис. 6,в).

Крепление сердечника трансформатора. В маломощных силовых трансформаторах применяются два основных способа крепления собранного пакета сердечника:

1) крепление с помощью шпилек. В этом случае пакет сердечника трансформатора сжимается посредством шпилек и скоб из полосовой стали толщиной 1—2 мм (рис. 7). В броневого трансформаторах для крепления сердечника иногда применяется

штампованная из листовой стали деталь, служащая одновременно и кожухом трансформатора (рис. 8);

2) крепление запрессовкой сердечника в обойму. В этом случае собранный пакет сердечника трансформатора обжимается специальной обоймой, ушки которой служат для крепления трансформатора на месте установки (рис. 9). Крепление обоймой может применяться при мощностях трансформатора до 100 *ва* и выше.

Заготовка пластин для сердечника трансформатора. Материалом для сердечника маломощного силового трансформатора служит специальная листовая электротехническая сталь марок Э41, Э11

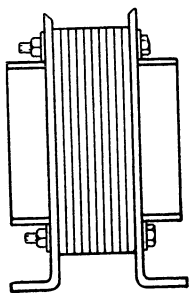


Рис. 7. Трансформатор с сердечником, стянутым накладками

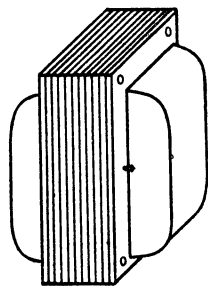


Рис. 8. Трансформатор с сердечником, стянутым штампованными крышками

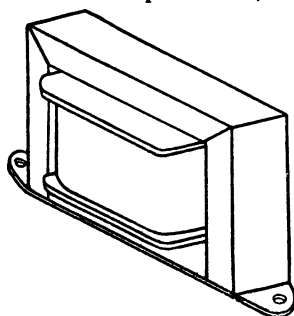


Рис. 9. Трансформатор с запрессованным в обойму сердечником

и др: (старые марки Э4А и Э1А) толщиной листа 0,50 и 0,35 *мм*. Основные технические данные листовой стали различных марок определяются ГОСТ 802-54 (приложение IV).

Для изготовления сердечника из листовой стали штампуются пластины П-образной формы—в случае однофазных стержневых трансформаторов и Ш-образной формы—для однофазных броневых и трехфазных стержневых трансформаторов. При отсутствии возможности штамповки фигурных пластин производится заготовка прямоугольных пластин резкой листов на ножницах. Как при штамповке, так и при резке заготовок из листов стали желательно делать пластины вдоль направления прокатки стали, так как магнитная проницаемость стали в этом направлении несколько больше.

При штамповке и резке заготовок необходимо производить раскрой стали с возможно меньшими отходами (рис. 10). Для уменьшения отходов размеры и форма пластин сердечника должны быть выбраны при расчете с учетом размеров стандартного листа стали 750 × 1500 или 1000 × 2000 *мм*. В целях уменьшения потерь на вихревые токи в сердечнике трансформатора, листы стали покрываются с одной стороны или тонким слоем лака, или оксидируются.

Изготовление витых сердечников маломощных трансформаторов производится из холоднокатанной стали на специальных намоточных станках. Изоляцией между витками обычно служит оксидная пленка. После термической обработки витки сердечника могут склеиваться бакелитовым лаком и запекаться. Полимеризация этого лака производится при температурах 100—150° С. В случае необходимости разрезки сердечника (см. рис. 5,б), эта операция выполняется корундовым кругом. Плоскости разрезанных поперечных частей затем шлифуются на шлифовальном станке.

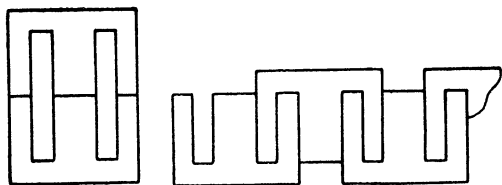


Рис. 10. Способы „безотходной“ штамповки пластин трансформатора броневого типа

Конструкция катушек маломощных трансформаторов.

Катушки маломощных силовых трансформаторов, имеющих обмотку из проводов малого диаметра, как правило, выполняются в виде каркаса, на который наматываются обмотки. Каркасы катушек делаются обычно из изолирующего материала

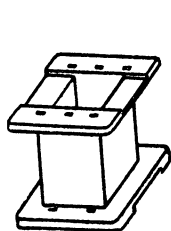


Рис. 11. Штампованный из пластмассы каркас катушки трансформатора

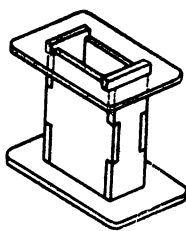


Рис. 12. Сборный каркас катушки трансформатора

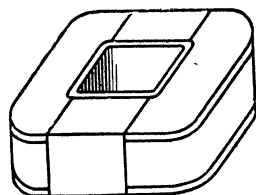


Рис. 13. Бескаркасная намотка катушки трансформатора

или путем штамповки из пластмассы (рис. 11), или клееные из электрокартона, гетинакса и других материалов (рис. 12). В отдельных случаях, при диаметрах проводов порядка 1 мм и выше, катушки могут выполняться без каркаса. При этом намотка производится на изоляционную гильзу из электрокартона, отдельные слои обмотки перевязываются хлопчатобумажной лентой (рис. 13).

Пропитка катушек изолирующим лаком. После намотки катушки должны быть пропитаны изолирующим лаком. Пропитка лаком повышает электрическую прочность изоляции обмотки, увеличивает ее механическую прочность, увеличивает теплостойкость и теплопроводность изоляции, а также защищает обмотку от влаги. В качестве пропитывающих лаков

могут быть использованы асфальто-масляные лаки № 447 и 458, глипталевый лак № 321. Не следует применять в качестве разбавителей лака бензол, вредно действующий на эмалевую пленку обмоточных проводов.

Перед пропиткой катушки должны быть просушены в течение 2—3 час. при температуре около 100°C . Пропитка катушек лаком производится при температуре $60\text{--}70^{\circ}\text{C}$ в течение 3—5 мин., а сушка лака — при температуре $110\text{--}115^{\circ}\text{C}$ в течение 3—8 час.

Пропитка катушек лаком получается более эффективной при создании в пропиточном котле вакуума до 1 мм рт. ст. с последующим повышением давления после некоторого времени примерно до 3—4 атм.

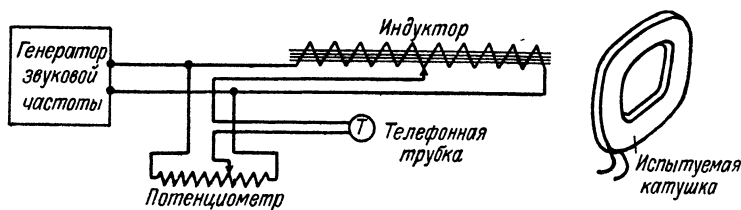


Рис. 14. Схема установки для определения междувитковых замыканий в катушках

Испытание катушек на витковое замыкание. Прежде чем надевать готовые катушки на стержни сердечника трансформатора, необходимо проверить их на отсутствие в них так называемых витковых замыканий. Необходимость проверки на отсутствие витковых замыканий катушек маломощных трансформаторов вызывается тем обстоятельством, что для их изготовления применяются в основном провода с эмалевой изоляцией.

Проверка на витковое замыкание может производиться на установке, схематически представленной на рис. 14. Установка состоит из индуктора, генератора звуковой частоты, высокоомного потенциометра и телефонной трубки. Индуктор имеет сердечник из пучка тонкой железной проволоки. На сердечник наматываются две обмотки, включенные последовательно. Обмотки индуктора обматываются хлопчатобумажной лентой и все в целом пропитывается изоляционным лаком.

В качестве источника питания может быть использован генератор переменного тока с частотой 500—1000 гц и мощностью 10—100 вт. В качестве потенциометра можно использовать высокоомный реостат с ползунком (1000—5000 ом), в качестве индикатора — телефонную трубку с наушником. Телефонная трубка включается последовательно между средней точкой обмотки индуктора и ползунком потенциометра (рис. 14). Перемещением ползунка потенциометра можно

получить однопотенциальность средней точки обмотки индуктора и ползунка, что характеризуется исчезновением звука в телефонной трубке. Наличие витковых замыканий в катушке, надетой на конец индуктора, вызывает изменение индуктивного сопротивления одной из половин обмоток индуктора, вследствие чего нарушается однопотенциальность средней точки обмотки и ползунка потенциометра, и в телефонной трубке появляется звук. Исправные катушки не изменяют магнитного поля и в телефонной трубке звука не будет.

Выбор материала для сердечника. Как указывалось выше, материалом для сердечников маломощных силовых трансформаторов служит специальная листовая электротехническая сталь различных марок, обозначаемых по ГОСТ 802-54 в виде Э41, Э11, Э310 и др. (старые марки Э4А, Э1А, ХВП и др.). Выбор стали для сердечника определяется назначением трансформатора, частотой сети и техническими условиями задания.

Для маломощных трансформаторов минимальной стоимости в основном применяется сталь марки Э41 (старая Э4А) толщиной $\delta_c = 0,5$ мм, с удельными потерями $k_c = 1,6$ Вт/кг при $B = 10000$ Гс, $f = 50$ Гц и $\delta_c = 0,35$ мм, с удельными потерями $k_c = 1,35$ Вт/кг при $B = 10000$ Гс. Для маломощных трансформаторов можно иногда применить сталь марки Э11 (старая Э1А). Сталь марки Э11 мягкая, обрабатывается легче, чем сталь Э41, и дешевле по стоимости, но имеет повышенные удельные потери $k_c = 3,3$ Вт/кг при $B = 10000$ Гс, $f = 50$ Гц и $\delta_c = 0,5$ мм.

Применение стали марки Э11 толщиной $\delta_c = 0,5$ мм для сердечников маломощных трансформаторов при частоте 50 Гц иногда может быть оправдано в так называемых „дешевых“ трансформаторах из-за возможной экономии меди на обмотки — около 7% за счет большего коэффициента заполнения поперечного сечения сердечника сталью, а также ввиду некоторого уменьшения стоимости сердечника при почти неизменных значениях общих потерь и к. п. д.

Для трансформаторов минимального веса с витыми сердечниками может быть применена холоднокатанная сталь с повышенной магнитной проницаемостью марки Э310 (старая марка ХВП).

Для маломощных трансформаторов повышенной частоты (200—400 Гц) может быть рекомендована сталь марок Э34, Э340, Э44, Э47 и Э48 с толщиной листа при мощностях до 100 вА — $\delta_c = 0,35$ мм и при мощностях свыше 100 вА — $\delta_c = 0,20 \div 0,35$ мм и пониженными удельными потерями.

При выборе толщины листа стали необходимо учитывать зави-

Таблица 1

Толщина листа δ_c мм	Коэффициент заполнения поперечного сечения стержня сталью k_3	Изоляция между листами
0,5	0,92	Лак
0,35	0,86	»
0,2	0,76	»
0,1	0,65	»

симость коэффициента заполнения поперечного сечения стержня сталью от этой толщины. Средние значения коэффициента заполнения даны в табл. 1.

II. РАСЧЕТ МАЛОМОЩНЫХ ОДНОФАЗНЫХ И ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Исходными данными для расчета маломощных силовых трансформаторов являются следующие величины:

число фаз m ;
номинальные мощности вторичных обмоток $P_2, P_3, \dots, P_n$ [ва];
номинальные напряжения $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ [в];
частота сети f [гц];
коэффициенты мощности нагрузок $\cos \varphi_2, \cos \varphi_3, \dots, \cos \varphi_n$;
особые условия—минимум стоимости, минимум веса, способ охлаждения и др.

1. Определение токов трансформатора

При определении тока первичной обмотки следует учитывать потери, а также намагничивающий ток трансформатора, относительная величина которых в маломощных силовых трансформаторах весьма значительна.

Величины токов могут быть определены по следующим формулам:

а) для однофазного трансформатора

$$I_1 = \frac{P}{U_1 \eta \cos \varphi_1}; I_2 = \frac{P_2}{U_2}; I_3 = \frac{P_3}{U_3}; \dots; I_n = \frac{P_n}{U_n};$$

б) для трехфазного трансформатора

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} U_1 \eta \cos \varphi_1}; I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} U_2}; I_3 = \frac{P_3}{\sqrt{3} U_3}; \dots; I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n},$$

где P —суммарная активная мощность вторичных обмоток трансформатора, *вт*:

$$P = P_2 \cos \varphi_2 + P_3 \cos \varphi_3 + \dots + P_n \cos \varphi_n.$$

$U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ —напряжения отдельных обмоток по заданию;

$P_2, P_3, \dots, P_n$ —мощности вторичных обмоток в *ва* по заданию;

$\cos \varphi_2, \cos \varphi_3, \dots, \cos \varphi_n$ —коэффициенты мощности нагрузок по заданию;

η —к. п. д., величина которого для маломощных трансформаторов до нескольких сотен вольт-ампер обычно находится в пределах 0,70—0,93.

Предварительная величина к. п. д. выбирается по кривой рис. 15.

Величина $\cos \varphi_1$ может быть определена по формуле

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{\sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}},$$

где активная и реактивная составляющие тока первичной обмотки определяются следующим образом:

а) для однофазного трансформатора

$$I_{1a} \approx \frac{P_2 \cos \varphi_2 + P_3 \cos \varphi_3 + \dots + P_n \cos \varphi_n}{\eta U_1},$$

$$I_{1p} \approx I_\mu + \frac{P_2 \sin \varphi_2 + P_3 \sin \varphi_3 + \dots + P_n \sin \varphi_n}{\eta U_1};$$

б) для трехфазного трансформатора

$$I_{1a} \approx \frac{P_2 \cos \varphi_2 + P_3 \cos \varphi_3 + \dots + P_n \cos \varphi_n}{\sqrt{3} \eta U_1},$$

$$I_{1p} \approx \frac{I_{\mu 1} + 2I_{\mu 2}}{3} +$$

$$+ \frac{P_2 \sin \varphi_2 + P_3 \sin \varphi_3 + \dots + P_n \sin \varphi_n}{\sqrt{3} \eta U_1},$$

где $I_{\mu 1}$ и $I_{\mu 2}$ — намагничивающие токи в средней и крайней фазах трехфазного трансформатора.

В большинстве случаев нагрузка маломощных трансформаторов обычно активная; в этом случае величина реактивной составляющей тока первичной обмотки практически определяется намагничивающим током I_μ , и $\cos \varphi_1$ может быть получен из формулы

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{\sqrt{I_{1a}^2 + I_\mu^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_\mu}{I_{1a}}\right)^2}}.$$

Предельное значение намагничивающего тока I_μ определяется величиной индукции в сердечнике трансформатора. Как известно, увеличение этой индукции уменьшает число витков обмоток, а следовательно, и расход меди на них. Вместе с этим уменьшается и стоимость трансформатора. Если в мощных трансформаторах пределом увеличения индукции являются потери

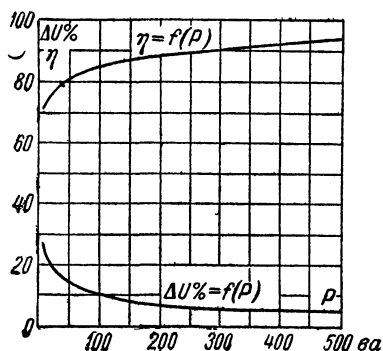


Рис. 15. Кривые зависимости к. п. д. и падения напряжения маломощных трансформаторов от мощности

в стали сердечника и его нагрев, то в маломощных трансформаторах при 50 гц пределом увеличения индукции является величина намагничивающего тока. Возрастание этого тока вызывает необходимость увеличения сечения провода первичной обмотки, а следовательно, и веса меди ее, что снижает экономию меди за счет увеличения индукции. Пределом увеличения намагничивающего тока I_μ будет такое значение последнего, при котором перерасход меди за счет возрастания его становится равным экономии меди за счет увеличения индукции.

Как показывают расчет и опыт, для маломощных трансформаторов с активной нагрузкой величина предельного значения намагничивающего тока I_μ может составлять около 40—50% от I_{1a} . При смешанной активной и индуктивной нагрузке предельное значение I_μ несколько меньше.

Средством снижения намагничивающего тока в маломощных трансформаторах может служить увеличение поперечного сечения ярма на 15—20% по сравнению с сечением стержня. В этом случае возможно повысить предельное значение индукции в стержне до 10% с соответствующим снижением стоимости трансформатора.

2. Выбор индукции в стержне и ярме сердечника трансформатора

Допустимая величина индукции в стержне и ярме сердечника трансформатора определяется выбранным предельным значением намагничивающего тока и, кроме того, зависит от мощности, частоты и типа трансформатора, числа стыков в сердечнике и материала последнего. Для трансформаторов с сердечником броневого типа из электротехнической стали марок Э41 и Э11 (старые марки Э4А и Э1А), с числом стыков в сердечнике до двух и допущении намагничивающего тока I_μ до 40—50% от активной составляющей первичного тока I_{1a} , индукцию в стержне сердечника можно принять в следующих пределах:

$$B_c = 12\,000 \div 13\,000 \text{ гс.}$$

В трансформаторах броневого типа с увеличенным сечением ярма на 15—20% величина индукции в стержне может быть принята:

$$B_c = 12\,500 \div 13\,500 \text{ гс.}$$

В маломощных трансформаторах стержневого типа с числом стыков в сердечнике до четырех величина индукции в стержне должна быть принята примерно на 5—10% меньше, чем у соответствующих трансформаторов броневого типа.

В трансформаторах повышенной частоты (200—400 *гц*) величина индукции в стержне определяется величиной потерь и нагревом его. Обычно в этом случае индукция в стержне составляет не более 5000—7000 *гс*.

3. Выбор плотности тока в проводах обмоток трансформатора

Допускаемая величина плотности тока в проводах обмоток трансформатора в значительной мере определяет вес и стоимость последнего. Чем выше плотность тока в обмотках, тем меньше вес меди их и соответственно стоимость трансформатора. С другой стороны, с увеличением плотности тока возрастают потери в меди обмоток и нагрев трансформатора.

Чем меньше номинальная мощность трансформатора, тем лучше условия охлаждения его, а следовательно, и выше может быть допускаемая плотность тока в обмотках.

В трансформаторах мощностью примерно до 100 *ва* допускаемая плотность тока в проводах обмоток может составлять:

$$j = 4,5 \div 3,5 \text{ а/мм}^2.$$

В трансформаторах мощностью свыше 100 *ва* и до нескольких сотен вольтампер эта плотность обычно составляет:

$$j = 3,5 \div 2,5 \text{ а/мм}^2.$$

При температуре окружающей среды 50—60° С следует выбирать низкие пределы плотности тока.

4. Определение поперечного сечения стержня и ярма сердечника трансформатора

Отношение потерь в меди обмоток трансформатора к потерям в стали сердечника:

$$\beta = \frac{P_m}{P_c} = \frac{2,4 j^2 G_m}{k_c (B_c \cdot 10^{-4})^2 G_c} = \frac{2,4}{k_c} \left(\frac{j}{B_c \cdot 10^{-4}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\alpha}.$$

В маломощных силовых трансформаторах, работающих приблизительно при нормальных нагрузках, это отношение по условиям максимума к. п. д., как указывалось выше, желательно иметь в пределах:

$$\beta = 1,25 \div 1,35;$$

однако в некоторых случаях эта величина может отличаться от указанных значений в большую сторону, а именно, при частоте 50 *гц* она может достигать $\beta \approx 2 \div 2,5$, а при частоте 400 *гц* — $\beta \approx 0,9 \div 1,5$.

Отношение веса стали сердечника к весу меди обмоток составляет:

$$\alpha = \frac{G_c}{G_m} = \frac{2,4}{k_c} \left(\frac{j}{B_c \cdot 10^{-4}} \right)^2 \frac{1}{\beta},$$

где B_c берется из позиции 2, j — из позиции 3.

Удельные потери в стали сердечника k_c при $B=10000$ гс и $f=50$ гц, по данным ГОСТ 802-54, в зависимости от марки стали и толщины листа δ_c составляют:

марка стали Э41 (старая марка Э4А):

$$\begin{aligned} \text{при } \delta_c &= 0,35 \text{ мм} - k_c = 1,35 \text{ вт/кг}; \\ \text{„ } \delta_c &= 0,50 \text{ „} - k_c = 1,60 \end{aligned}$$

марка стали Э11 (старая марка Э1А):

$$\text{при } \delta_c = 0,50 \text{ мм} - k_c = 3,3 \text{ вт/кг}.$$

Как показывают расчет и опыт, отношение веса активных материалов должно быть:

а) при минимуме стоимости трансформатора

$$\alpha = \frac{G_c}{G_m} = 4,5 \div 5,5;$$

б) при минимуме веса

$$\alpha = \frac{G_c}{G_m} = 2 \div 3.$$

Поперечное сечение стержня сердечника трансформатора определяется по следующей формуле:

$$S_c = C \sqrt{\frac{P_1 \alpha \cdot 10^8}{f B_c j}} [\text{см}^2],$$

где

$P_1 = U_1 I_1$ — потребляемая мощность однофазным трансформатором, *ва*;

$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1$ — то же, трехфазным трансформатором, *ва*;

$\alpha = \frac{G_c}{G_m}$ — отношение веса стали к весу меди обмотки,

определяется или по предыдущей формуле, или выбирается в зависимости от заданных технических условий;

U_1 и f — первичное напряжение и частота по заданию.

I_1 берется из позиции 1, B_c — из позиции 2, j — из позиции 3.

Постоянный коэффициент C в среднем может быть приближенно принят:

для однофазных трансформаторов стержневого типа	
с круглыми катушками	$C=0,5$
то же, с прямоугольными катушками	$C=0,6$
для однофазных трансформаторов броневоего типа	$C=0,7$
» трехфазных трансформаторов стержневого типа	
с круглыми катушками	$C=0,37$
то же, с прямоугольными катушками	$C=0,42$

Поперечное сечение ярма трансформатора стержневого типа может быть принято

$$S_{\text{я}} = (1,0 \div 1,2) \cdot S_{\text{с}} \text{ [см}^2\text{]}.$$

Поперечное сечение ярма трансформатора броневого типа

$$S_{\text{я}} = \frac{(1,0 \div 1,2) S_{\text{с}}}{2} \text{ [см}^2\text{]}.$$

Полные поперечные сечения стержня $S'_{\text{с}}$ и ярма $S'_{\text{я}}$ сердечника с учетом коэффициента заполнения сечения сталью определяются:

$$S'_{\text{с}} = \frac{S_{\text{с}}}{k_3}; \quad S'_{\text{я}} = \frac{S_{\text{я}}}{k_3},$$

где k_3 —коэффициент заполнения сечения сердечника сталью, берется из табл. 1 в зависимости от принятой толщины листа $\delta_{\text{с}}$.

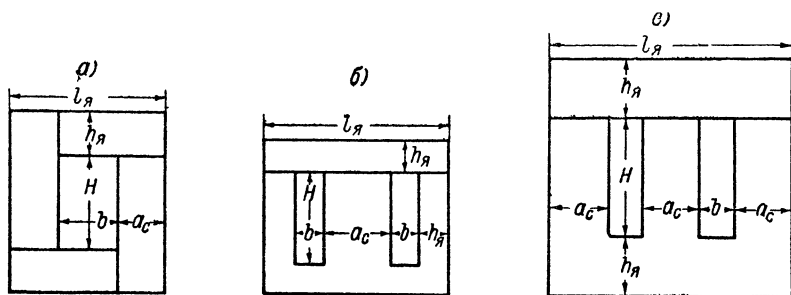


Рис. 16. Сердечники маломощных трансформаторов: а и б — стандартная форма пластин (приложения II и III), в — произвольные размеры Ш-образных пластин

Размер сторон квадратного поперечного сечения стержня (рис. 16):

$$a_{\text{с}} = b_{\text{с}} = \sqrt{S'_{\text{с}}} \text{ [см]}.$$

Возможно отступление от квадратной формы поперечного сечения стержня, при этом толщина пакета

$$b_{\text{с}} = (1,2 \div 2,0) a_{\text{с}}.$$

Высота ярма (рис. 16):

$$h_{\text{я}} = \frac{S'_{\text{я}}}{b_{\text{с}}} \text{ [см]}.$$

Окончательные размеры $a_{\text{с}}$, $b_{\text{с}}$ и $h_{\text{я}}$ следует согласовать с рациональным раскроем стандартного листа стали 750×1500

или 1000×2000 мм для получения минимальных отходов при штамповке или резке листа. Можно также выбрать ближайшую стандартную П-образную или Ш-образную пластины сердечника трансформатора из приложений II и III. В этом случае возможно отступление от квадратной формы поперечного сечения стержня для получения заданного сечения S'_c , при этом обычно $b_c \geq a_c$.

5. Определение числа витков обмоток трансформатора

Число витков первичной обмотки трансформатора может быть определено из выражения для э. д. с. обмоток трансформатора:

$$E_1 \approx U_1 - \frac{\Delta U}{2} = 4,44 f B_c S_c W_1 \cdot 10^{-8} \quad [\text{В}],$$

где $\frac{\Delta U}{2} = \frac{\Delta U \% \cdot U_1}{200}$ — падение напряжения в первичной обмотке, при этом $\Delta U \%$ предварительно выбирается по кривой рис. 15 в зависимости от мощности трансформатора.

Тогда предварительное значение числа витков первичной обмотки однофазного трансформатора будет:

$$W'_1 = \frac{E_1 \cdot 10^8}{4,44 f B'_c S_c} = \frac{\left(U_1 - \frac{\Delta U \% \cdot U_1}{200} \right) 10^8}{4,44 f B'_c S_c},$$

где U_1 и f — первичное напряжение и частота по заданию; B'_c берется из позиции 2, S_c — из позиции 4.

Напряжение, приходящееся на один виток обмотки при нагрузке

$$e'_w = \frac{E_1}{W'_1} \quad [\text{В/виток}].$$

Число витков вторичной обмотки

$$W'_2 = \frac{E_2}{e'_w} = \frac{U_2 + \frac{\Delta U}{2}}{e'_w} = \frac{U_2 + \frac{\Delta U \% \cdot U_2}{200}}{e'_w}.$$

Соответственно число витков для третьей обмотки

$$W'_3 = \frac{E_3}{e'_w} = \frac{U_3 + \frac{\Delta U \% \cdot U_3}{200}}{e'_w} \text{ и т. д.,}$$

где $U_2, U_3, \dots$ — вторичные напряжения по заданию.

Число витков обмотки низшего напряжения округляется до ближайшего целого числа с соответствующим пересчетом

числа вольт на виток, величины индукции в стержне и чисел витков в других обмотках, а именно:

$$e_w = e'_w \frac{W'_2}{W_2} [\text{в/виток}];$$

$$W_1 = W'_1 \frac{W_2}{W'_2}, \quad W_3 = W'_3 \frac{W_2}{W'_2} \text{ и т. д.};$$

$$B_c = B'_c \frac{W'_2}{W_2} [гс],$$

где W_2 —число витков обмотки низшего напряжения, округленное до ближайшего целого числа.

Напряжения на вторичных обмотках при холостом ходе:

$$U_{20} = E_2 = e_w W_2 [\text{в}]; \quad U_{30} = E_3 = e_w W_3 [\text{в}] \text{ и т. д.}$$

Для трехфазного трансформатора определение числа витков производится на одну фазу:

$$W'_1 = \frac{\left(U_1 - \frac{\Delta U \% \cdot U_1}{200} \right) 10^3}{\sqrt{3} \cdot 4,44 f B'_c S_c}; \quad e'_w = \frac{E_1}{W'_1} = \frac{U_1 - \frac{\Delta U \% \cdot U_1}{200}}{\sqrt{3} W'_1};$$

$$W'_2 = \frac{E_2}{e'_w} = \frac{U_2 + \frac{\Delta U \% \cdot U_2}{200}}{\sqrt{3} e'_w}; \quad W'_3 = \frac{U_3 + \frac{\Delta U \% \cdot U_3}{200}}{\sqrt{3} e'_w} \text{ и т. д.}$$

6. Определение сечения и диаметра проводов обмоток

Предварительные значения поперечных сечений проводов обмоток определяются по формулам

$$q'_1 = \frac{I'_1}{j'_1} [\text{мм}^2]; \quad q'_2 = \frac{I'_2}{j'_2} [\text{мм}^2]; \quad q'_3 = \frac{I'_3}{j'_3} [\text{мм}^2] \text{ и т. д.},$$

где $I_1, I_2, I_3, \dots$ берутся из позиции 1, $j'_1, j'_2, j'_3, \dots$ — из позиции 3.

Окончательные значения поперечных сечений и диаметров проводов выбираются по ближайшим данным ГОСТ из приложения I:

$$q_1 = \dots \text{мм}^2; \quad \frac{d_1}{d_{1н}} = \dots \text{мм}; \quad q_2 = \dots \text{мм}^2; \quad \frac{d_2}{d_{2н}} = \dots \text{мм};$$

$$q_3 = \dots \text{мм}^2; \quad \frac{d_3}{d_{3н}} = \dots \text{мм} \text{ и т. д.}$$

По выбранным окончательно сечениям проводов уточняются плотности тока в проводах обмоток:

$$j_1 = \frac{I_1}{q_1} [\text{а/мм}^2]; \quad j_2 = \frac{I_2}{q_2} [\text{а/мм}^2]; \quad j_3 = \frac{I_3}{q_3} [\text{а/мм}^2] \text{ и т. д.}$$

При сечении проводов $q > 10 \text{ мм}^2$ обмотку трансформатора следует выполнять проводом прямоугольной формы или же при круглом проводе выполнять намотку обмотки в два-три параллельных провода.

7. Выбор изоляции проводов обмоток

Размеры и марка изоляции проводов обмоток трансформаторов определяются государственными общесоюзными стандартами (ГОСТ). Марки проводов, применяемые в маломощных трансформаторах, указаны в приложении I.

Наиболее дешевой изоляцией провода является эмаль, однако надежность эмалевой изоляции недостаточна, поэтому область ее применения ограничена главным образом проводниками диаметром примерно до 2 мм. Более надежными по изоляции являются провода марки ПЭВ-2. Наилучшими проводами по изоляции считаются провода марок ПЭЛШО и ПЭЛШКО, но они применяются большей частью в ответственных машинах и аппаратах. Наибольшее применение для маломощных трансформаторов имеют провода марок ПЭЛ, ПЭТ и ПЭВ-2 с диаметрами до 1—2 мм и марки ПБД с диаметрами выше 1—2 мм.

8. Определение высоты и ширины окна сердечника трансформатора

Форма окна сердечника трансформатора оказывает значительное влияние на величину намагничивающего тока, расход стали на сердечник и меди на обмотки трансформатора. Излишняя высота окна сердечника H повышает намагничивающий ток I_μ и увеличивает расход стали и вес трансформатора. Заниженная высота окна повышает нагрев обмотки и увеличивает расход меди на них.

Как показывает опыт, наивыгоднейшая форма окна сердечника трансформатора получается при отношении высоты окна H к его ширине b в пределах 2,5—3,0 (рис. 16).

Если при расчете сердечника трансформатора принята стандартная форма П-образных или Ш-образных пластин из приложений II и III, то размеры H и b (рис. 16) берутся из этого же приложения.

При произвольном выборе размеров сердечника a_c , b_c и h_a предварительное значение высоты окна сердечника трансформатора может быть определено по формуле

$$H = \sqrt{k \frac{(q_1 W_1 + q_2 W_2 + q_3 W_3 + \dots + q_n W_n)}{100 k_0}} \quad [см],$$

где

k —отношение высоты к ширине окна сердечника:

$$k = \frac{H}{b} = 2,5 \div 3,0;$$

k_0 —коэффициент заполнения окна сердечника обмоткой; для маломощных силовых трансформаторов величина k_0 приближенно может быть принята в пределах $k_0 = 0,2 \div 0,3$;

$W_1, W_2, W_3, \dots$ берутся из позиции 5, $q_1, q_2, q_3, \dots$ —из позиции 6.

Ширина окна сердечника предварительно (рис. 16):

$$b = \frac{H}{k} [\text{см}].$$

Полученные здесь предварительные значения H и b окончательно уточняются при укладке обмоток на стержне сердечника трансформатора в позиции 9.

9. Укладка обмоток на стержнях и уточнение размеров окна сердечника трансформатора

При расположении обмоток на стержнях сердечника трансформатора нужно иметь в виду следующее. Чем меньше диаметр обмоточного провода, тем выше его стоимость. Поэтому для уменьшения общей стоимости трансформатора целесообразно обмотку с более тонким проводом располагать на стержне первой.

В случае трехобмоточных трансформаторов, в целях уменьшения взаимного влияния вторичных обмоток друг на друга при изменении нагрузки в них, желательно первичную обмотку располагать на стержне между вторичными обмотками. Однако в маломощных силовых трансформаторах индуктивные сопротивления обмоток весьма незначительны, и их влияние на падение напряжения в трансформаторе при нагрузке невелико. Ввиду этого в рассматриваемых трансформаторах практически можно отступать от теоретического положения размещения первичной обмотки на стержне между вторичными и взаимно размещать их в зависимости от конструктивных и других соображений.

Для уточнения ширины окна сердечника b необходимо вычислить радиальную толщину обмоток трансформатора. Число витков первичной обмотки в одном слое

$$n_1 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{1н}},$$

где $d_{1н}$ берется из позиции 6, H —из позиции 8; ε_1 —расстояние от обмотки до ярма, обычно $\varepsilon_1 = 2 \div 5$ мм.

В случае применения в броневом трансформаторе штампованных листов с одним зазором длина катушек по условиям сборки должна быть меньше длины стержня на 5—10%. В таком случае число витков в слое следует вычислять по формуле

$$n_1 \approx 0,9 \cdot \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{1н}}.$$

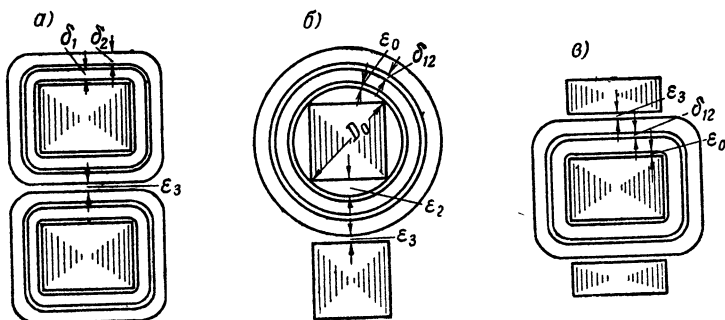


Рис. 17. Формы катушек маломощных двухобмоточных трансформаторов: а — стержневого двухкатушечного; б — стержневого однокатушечного; в — броневое

Число слоев первичной обмотки однофазного однокатушечного или броневое трансформаторов (рис. 17, б и в)

$$m_1 \approx \frac{W_1}{n_1};$$

полученное значение m_1 округляется до ближайшего большего целого числа.

В случае однофазного двухкатушечного трансформатора стержневого типа число витков на стержне будет (рис. 17, а):

$$\frac{W_1}{2}.$$

Толщина первичной обмотки

$$\delta_1 = m_1 (d_{1н} + \gamma_1),$$

где

γ_1 — толщина изоляционной прокладки между слоями;

$d_{1н}$ — берется из позиции 6.

Изоляционные прокладки следует применять лишь при напряжении между слоями свыше 50 в. Толщина изоляционных прокладок обычно не превышает 0,05—0,08 мм.

Число витков вторичной обмотки в одном слое

$$n_2 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{2н}}.$$

Число слоев вторичной обмотки однофазного однокатушечного или броневых трансформаторов (рис. 17, б и в)

$$m_2 = \frac{W_2}{n_2};$$

полученное значение m_2 также округляется до ближайшего большего целого числа.

В однофазном двухкатушечном трансформаторе стержневого типа число витков на стержне (рис. 17, а)

$$\frac{W_2}{2}.$$

Толщина вторичной обмотки

$$\delta_2 = m_2 (d_{2n} + \gamma_2),$$

где d_{2n} берется из позиции б; $\gamma_2 = \gamma_1$.

В случае трансформатора с тремя и более обмотками толщина обмоток вычисляется аналогичным образом.

Ширина окна сердечника однофазного трансформатора с одной круглой катушкой (рис 17, б)

$$b = \epsilon_0 + \epsilon_2 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3 + \delta_{3n} + \dots + \delta_n + \epsilon_3,$$

где

$$\epsilon_2 = \frac{D_0 - a_c}{2} \text{ — зазор от стержня до катушки (рис. 17, б);}$$

$\epsilon_0 = 1,0 \div 2,0$ — толщина изоляции между катушкой и стержнем, выполняемой обычно из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824-45);

$\delta_{12}, \delta_{23}, \dots, \delta_{3n}$ — толщина изоляции между обмотками, выполняемой обычно в маломощных трансформаторах из электрокартона ЭВ толщиной 0,50—1,0 мм (ГОСТ 2824-45);

ϵ_3 — расстояние от катушки до второго стержня, принимаемое обычно в пределах $\epsilon_3 = 3 \div 5$ мм;

$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$ — толщины соответствующих обмоток в миллиметрах.

Ширина окна однофазного трансформатора с двумя круглыми катушками, а также трехфазного трансформатора с аналогичными катушками (рис. 17, а)

$$b = 2(\epsilon_0 + \epsilon_2 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3 + \delta_{3n} + \dots + \delta_n) + \epsilon_3,$$

где ϵ_3 — расстояние между катушками, обычно $\epsilon_3 = 3 \div 5$ мм.

Ширина окна однофазного трансформатора с одной прямоугольной катушкой (рис. 17, в)

$$b = k_2(\epsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3 + \delta_{3n} + \dots + \delta_n) + \epsilon_3,$$

где k_2 — коэффициент увеличения толщины катушки за счет неплотностей прилегания слоев, в результате чего катушка

приобретает овальный вид. Величина этого коэффициента зависит от упругости проволоки и натяжения ее при намотке; ориентировочно можно принять

$$k_2 = 1,2 \div 1,3.$$

Ширина окна однофазного трансформатора с двумя прямоугольными катушками, а также трехфазного трансформатора с аналогичными катушками

$$b = 2k_2 (\epsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3 + \delta_{3n} + \dots + \delta_n) \epsilon_3.$$

Проверка правильности выбранных величин H и b по их отношению:

$$k = \frac{H}{b} = 2,5 - 3,0;$$

если полученное отношение $\frac{H}{b}$ выходит за указанные пределы, следует соответственно изменить высоту окна H , снова проверить укладку обмотки и определить новое значение ширины окна b .

10. Вес меди обмоток трансформатора

Вес меди обмоток трансформаторов определяется по следующим формулам:

а) для однофазного трансформатора

$$G_{m1} = 8,9 W_1 q_1 l_{w1} \cdot 10^{-5} [\kappa z];$$

$$G_{m2} = 8,9 W_2 q_2 l_{w2} \cdot 10^{-5} [\kappa z];$$

$$G_{m3} = 8,9 W_3 q_3 l_{w3} \cdot 10^{-5} [\kappa z];$$

$$\dots \dots \dots ; \dots$$

$$G_{mn} = 8,9 W_n q_n l_{wn} \cdot 10^{-5} [\kappa z];$$

б) для трехфазного трансформатора

$$G_{m1} = 3 \cdot 8,9 W_1 q_1 l_{w1} \cdot 10^{-5} [\kappa z];$$

$$G_{m2} = 3 \cdot 8,9 W_2 q_2 l_{w2} \cdot 10^{-5} [\kappa z];$$

$$G_{m3} = 3 \cdot 8,9 W_3 q_3 l_{w3} \cdot 10^{-5} [\kappa z];$$

$$\dots \dots \dots$$

$$G_{mn} = 3 \cdot 8,9 W_n q_n l_{wn} \cdot 10^{-5} [\kappa z].$$

Полный вес меди обмоток

$$G_m = G_{m1} + G_{m2} + G_{m3} + \dots + G_{mn} [\kappa z],$$

где $W_1, W_2, W_3, \dots$ берутся из позиции 5, $q_1, q_2, q_3, \dots$ — из позиции 6; l_w — средняя длина витка обмотки в сантиметрах, определяемая следующим образом:

а) в случае круглых катушек обмоток (рис. 18, а)

$$l_{w1} = \pi (a_c \sqrt{2} + 2\varepsilon_0 + 2\delta_2 + 2\delta_{12} + \delta_1) \text{ [см]},$$

$$l_{w2} = \pi (a_c \sqrt{2} + 2\varepsilon_0 + \delta_2) \text{ [см]},$$

$$l_{w3} = \pi (a_c \sqrt{2} + 2\varepsilon_0 + 2\delta_2 + 2\delta_{12} + 2\delta_1 + 2\delta_{13} + \delta_3) \text{ [см]},$$

.....

$$l_{wn} = \pi (a_c \sqrt{2} + 2\varepsilon_0 + 2\delta_2 + 2\delta_{12} + 2\delta_1 + 2\delta_{13} + 2\delta_3 + 2\delta_{3n} + \dots + \delta_n) \text{ [см]};$$

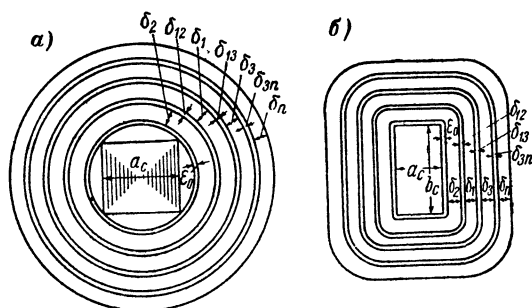


Рис. 18. Формы катушек маломощных многообмоточных трансформаторов. а — круглые; б — прямоугольные

б) в случае прямоугольных катушек обмоток (рис. 18, б)

$$l_{w1} \approx 2 [a_c + b_c + 4(\varepsilon_0 + \delta_2 + \delta_{12}) + 2\delta_1] \text{ [см]},$$

$$l_{w2} \approx 2 (a_c + b_c + 4\varepsilon_0 + 2\delta_2) \text{ [см]},$$

$$l_{w3} \approx 2 [a_c + b_c + 4(\varepsilon_0 + \delta_2 + \delta_{12} + \delta_1 + \delta_{13}) + 2\delta_3] \text{ [см]},$$

.....

$$l_{wn} \approx 2 [a_c + b_c + 4(\varepsilon_0 + \delta_2 + \delta_{12} + \delta_1 + \delta_{13} + \delta_3 + \delta_{3n} + \dots) + 2\delta_n] \text{ [см]},$$

где a_c и b_c берутся из позиции 4, $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots$ — из позиции 9.

11. Потери в меди обмоток трансформатора

Потери в меди обмотки трансформатора при 75°C определяются по следующей формуле:

$$P_m = 2,4 j^2 G_m \text{ [вт]},$$

где

j —плотность тока соответствующей обмотки в $a/мм^2$, определяемая из позиции 6;

G_m —вес меди соответствующей обмотки в $кг$, определяемый из позиции 10;

2,4—удельные потери в меди в $вт/кг \cdot a/мм^2$ при условной температуре нагрева $75^\circ C$; при другой температуре нагрева θ эти потери нужно умножить на отношение $\frac{1 + 0,004(\theta - 20)}{1,22}$.

Потери в меди вычисляются для каждой обмотки трансформатора отдельно.

Суммарные потери в меди обмоток

$$P_m = P_{m1} + P_{m2} + P_{m3} + \dots P_{mn} [вт].$$

12. Вес стали сердечника трансформатора

Вес стали сердечника трансформатора определяется:

а) для однофазного трансформатора стержневого типа (рис. 16, а)

вес стержней

$$G_{cc} = 2 \cdot 7,8 H S_c \cdot 10^{-3} [кг];$$

вес ярем

$$G_{cя} = 2 \cdot 7,8 l_{я} S_{я} \cdot 10^{-3} [кг];$$

б) для однофазного трансформатора броневое типа (рис. 16, б)

вес стержня

$$G_{cc} = 7,8 H S_c \cdot 10^{-3} [кг];$$

вес ярем

$$G_{cя} = 2 \cdot 7,8 (H + l_{я}) S_{я} \cdot 10^{-3} [кг];$$

в) для трехфазного трансформатора (рис. 16, в):

вес стержней

$$G_{cc} = 3 \cdot 7,8 H S_c \cdot 10^{-3} [кг],$$

вес ярем

$$G_{cя} = 2 \cdot 7,8 l_{я} S_{я} \cdot 10^{-3} [кг].$$

Полный вес сердечника трансформатора:

$$G_c = G_{cc} + G_{cя} [кг].$$

Длины ярем различных сердечников будут:

$$\text{рис. 16, а: } l_{я} = b + 2a_c [см],$$

$$\text{рис. 16, б: } l_{я} = 2b + a_c + 2h_{я} [см],$$

$$\text{рис. 16, в: } l_{я} = 2b + 3a_c [см],$$

где S_c , $S_{я}$, a_c и b_c берутся из позиции 4, H и b —из позиции 8 или 9.

13. Потери в стали сердечника трансформатора

Потери в стали стержней сердечника

$$P_{cc} = k_c \left(\frac{B_c}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G_{cc} \text{ [вт]}.$$

Потери в стали ярем

$$P_{cя} = k_c \left(\frac{B_{я}}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G_{cя} \text{ [вт]}.$$

Полные потери в стали сердечника

$$P_c = P_{cc} + P_{cя} \text{ [вт]}.$$

Здесь B_c и $B_{я}$ берутся из позиции 2, k_c — из позиции 4.

14. Определение тока холостого хода трансформатора

Ток холостого хода трансформатора

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0\mu}^2} \approx I_{0\mu},$$

где

I_{0a} — активная составляющая тока холостого хода;

$I_{0\mu}$ — реактивная составляющая его или намагничивающий ток.

Активная составляющая тока холостого хода зависит от потерь в стали сердечника и в меди первичной обмотки трансформатора от тока холостого хода. Она относительно мала по сравнению с намагничивающим током и ею при расчете тока холостого хода малоомощного трансформатора практически можно пренебречь. Намагничивающий ток здесь может быть определен по формуле

$$I_{0\mu} = \frac{a\omega_c l'_c + a\omega_{я} l'_{я} + 0,8 B n \delta_3}{\sqrt{2} W_1},$$

где

$\delta_3 = 0,004 \text{ см}$ — величина эквивалентного воздушного зазора в сердечнике трансформатора;

n — число зазоров в сердечнике: в однофазном стержневом трансформаторе $n=4$ или 2, в однофазном броневом трансформаторе из штампованных листов $n=2$ или 1, в трехфазном трансформаторе $n=2$ или 1;

$a\omega_c$ и $a\omega_{я}$ — удельные м. д. с. в стержне и ярме трансформатора в соответствии с индукциями B_c и $B_{я}$, определяемые по кривым рис. 41;

W_1 — число витков первичной обмотки из позиции 5;

l'_c — средняя длина пути магнитного потока в стержнях трансформатора;

а) для однофазного стержневого трансформатора (рис. 16, а)

$$l'_c = 2H \text{ [см]};$$

б) для однофазного броневого и трехфазного трансформатора (рис. 16, б и в)

$$l'_c = H \text{ [см]};$$

$l'_я$ —средняя длина пути магнитного потока в ярах трансформатора:

а) для однофазного стержневого трансформатора

$$l'_я = 2l_я \text{ [см]};$$

б) для однофазного броневого трансформатора

$$l'_я = H + l_я \text{ [см]};$$

в) для трехфазного трансформатора
крайняя фаза

$$l'_я = l_я \text{ [см]};$$

средняя фаза

$$l'_я = 0,$$

где

H —высота окна сердечника из позиции 8 или 9,

$l_я$ —из позиции 12.

Величина тока холостого хода трехфазного трансформатора определяется как среднее арифметическое из токов трех фаз.

15. Коэффициент полезного действия трансформатора

Величина к. п. д. при номинальной нагрузке может быть определена по формуле

$$\eta = \frac{P}{P + P_c + P_m} \cdot 100.$$

К. п. д. при частичной нагрузке γP приближенно может быть определен по формуле

$$\eta \approx \frac{\gamma P}{\gamma P + P_c \left(1 + \frac{\Delta U \%}{200} - \gamma \frac{\Delta U \%}{200} \right)^2 + \gamma^2 (P_m - I_\mu^2 r_1) + I_\mu^2 r_1} \cdot 100,$$

где

P —берется из позиции 1, $\Delta U \%$ —из позиции 5, P_m —из позиции 11, P_c —из позиции 13, I_μ —из позиции 14;

r_1 —активное сопротивление первичной обмотки из позиции 16;

γ —коэффициент, характеризующий отношение данной нагрузки трансформатора к номинальной.

16. Активные падения напряжения и сопротивления обмоток трансформатора

Относительное активное падение напряжения в первичной обмотке однофазного трансформатора при номинальной нагрузке всех вторичных обмоток

$$e_{a1} \% = \frac{P_{m1}}{U_1 I_1} \cdot 100.$$

Относительные активные падения напряжения во вторичных обмотках при номинальных нагрузках

$$e_{a2} \% = \frac{P_{m2}}{U_2 I_2} \cdot 100;$$

$$e_{a3} \% = \frac{P_{m3}}{U_3 I_3} \cdot 100;$$

· · · · ·

$$e_{an} \% = \frac{P_{mn}}{U_n I_n} \cdot 100.$$

В случае трехфазного трансформатора нужно правые части этих формул разделить на $\sqrt{3}$.

Активные сопротивления обмоток однофазного трансформатора:

$$r_1 = \frac{P_{m1}}{I_1^2} [\text{ом}];$$

$$r_2 = \frac{P_{m2}}{I_2^2} [\text{ом}];$$

$$r_3 = \frac{P_{m3}}{I_3^2} [\text{ом}];$$

· · · · ·

$$r_n = \frac{P_{mn}}{I_n^2} [\text{ом}].$$

В случае трехфазного трансформатора нужно правые части этих формул разделить на 3. *

Активное сопротивление короткого замыкания двухобмоточного трансформатора, приведенное к первой обмотке:

$$r_k = r_1 + r'_2 = r_1 + r_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 [\text{ом}].$$

Активные сопротивления короткого замыкания пар обмоток многообмоточного трансформатора, приведенные к первой обмотке:

$$r_{к12} = r_1 + r'_2 = r_1 + r_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 [OM],$$

$$r_{к13} = r_1 + r'_3 = r_1 + r_3 \left(\frac{W_1}{W_3} \right)^2 [OM],$$

.

$$r_{к1n} = r_1 + r'_n = r_1 + r_n \left(\frac{W_1}{W_n} \right)^2 [OM],$$

где $U_1, U_2, U_3, \dots$ берутся из задания, $I_1, I_2, I_3, \dots$ — из позиции 1, $W_1, W_2, W_3, \dots$ — из позиции 5, $P_{м1}, P_{м2}, P_{м3}, \dots$ — из позиции 11.

17. Индуктивные падения напряжения и сопротивления обмоток трансформатора

Относительные индуктивные падения напряжения в отдельных обмотках двухобмоточного трансформатора:

$$e_{s1} \% = \frac{4f I_1 W_1 \delta_{s12} l_{w1} \cdot 10^{-6}}{e_w l_s};$$

$$e_{s2} \% = \frac{4f I_2 W_2 \delta_{s12} l_{w2} \cdot 10^{-6}}{e_w l_s};$$

$$e_s \% = e_{s1} \% + e_{s2} \%.$$

Относительные индуктивные падения напряжения пар обмоток многообмоточного трансформатора, отнесенные к мощности первой обмотки, при расположении последней на стержне между вторичными (рис. 19):

$$e_{s12} \% = \frac{4f \left(I_1 W_1 l_{w1} + I_2 W_2 l_{w2} \frac{P_1}{P_2} \right) \delta_{s12} \cdot 10^{-6}}{e_w l_s};$$

$$e_{s13} \% = \frac{4f \left(I_1 W_1 l_{w1} + I_3 W_3 l_{w3} \frac{P_1}{P_3} \right) \delta_{s13} \cdot 10^{-6}}{e_w l_s};$$

.

$$e_{s1n} \% = \frac{4f \left(I_1 W_1 l_{w1} + I_n W_n l_{wn} \frac{P_1}{P_n} \right) \delta_{s1n} \cdot 10^{-6}}{e_w l_s};$$

$$e_{s23} \% = \frac{4f \left(I_2 W_2 l_{w2} \frac{P_1}{P_2} + I_3 W_3 l_{w3} \frac{P_1}{P_3} \right) \delta_{s23} \cdot 10^{-6}}{e_w l_s};$$

$$\dots \dots \dots$$

$$e_{s2n} \% = \frac{4f \left(I_2 W_2 l_{w2} \frac{P_1}{P_2} + I_n W_n l_{wn} \frac{P_1}{P_n} \right) \delta_{s2n} \cdot 10^{-6}}{e_w l_s}.$$

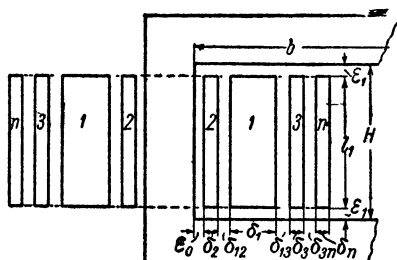


Рис. 19. Расположение обмоток на сердечнике трансформатора

Индуктивные падения напряжения отдельных обмоток много-обмоточного трансформатора (рис. 19):

а) пара обмоток 1 и 2:

$$e_{s1} \% = \frac{4f I_1 W_1 l_{w1} \delta_{s12} \cdot 10^{-6}}{e_w l_s};$$

$$e_{s2} \% = e_{s12} \% - e_{s1} \%;$$

б) пара обмоток 1 и 3:

$$e'_{s1} \% = \frac{4f I_1 W_1 l_{w1} \delta_{s13} \cdot 10^{-6}}{e_w l_s};$$

$$e_{s3} \% = e_{s13} \% - e'_{s1} \%;$$

$$\dots \dots \dots$$

н) пара обмоток 1 и n:

$$e_{sn}^n \% = \frac{4f I_1 W_1 l_{w1} \delta_{s1n} \cdot 10^{-6}}{e_w l_s};$$

$$e_{sn} \% = e_{s1n}^n \% - e_{s1}^n \%,$$

где

$$\delta_{s12} = \delta_{12} + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} \text{ [см]};$$

$$\delta_{s18} = \delta_{18} + \frac{\delta_1 + \delta_3}{3} [см];$$

.....

$$\delta_{s1n} = \delta_{18} + \delta_3 + \dots + \delta_{3n} + \frac{\delta_1 + \delta_n}{3} [см];$$

$$\delta_{s23} = \delta_{12} + \delta_1 + \delta_{18} + \frac{\delta_2 + \delta_3}{3} [см];$$

.....

$$\delta_{s2n} = \delta_{12} + \delta_1 + \delta_{18} + \delta_3 + \dots + \delta_{3n} + \frac{\delta_2 + \delta_n}{3} [см],$$

$f, P_2, P_3, \dots$ — частота и мощности вторичных обмоток по заданию, $ва$;

$P_1 = U_1 I_1$ — первичная мощность трансформатора, $ва$;

$I_1, I_2, I_3, \dots$ берутся из позиции 1, e_w ,

$W_1, W_2, W_3, \dots$ — из позиции 5, $\delta_1, \delta_2,$

$\delta_3, \dots, \delta_{12}, \delta_{18}, \delta_{23}, \dots$ — из позиции 9,

$l_{w1}, l_{w2}, l_{w3}, \dots$ — из позиции 10;

$l_s \approx H$ — длина пути магнитных линий рассеяния, $см$.

Индуктивное сопротивление короткого замыкания двухобмоточного трансформатора, приведенное к первой обмотке:

$$x_k = x_1 + x'_2 = \frac{e_s \% \cdot U_1}{100 I_1} [ом].$$

Индуктивные сопротивления короткого замыкания пар обмоток многообмоточного трансформатора, приведенные к первой обмотке:

$$x_{k12} = x_1 + x'_2 = \frac{e_{s12} \% \cdot U_1}{100 I_1} [ом];$$

$$x_{k13} = x'_1 + x'_3 = \frac{e_{s13} \% \cdot U_1}{100 I_1} [ом];$$

.....

$$x_{k1n} = x'_1 + x'_n = \frac{e_{s1n} \% \cdot U_1}{100 I_1} [ом].$$

18. Полные сопротивления и напряжения короткого замыкания обмоток трансформатора

Полное сопротивление короткого замыкания двухобмоточного трансформатора

$$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} [ом].$$

Полные сопротивления короткого замыкания пар обмоток многообмоточного трансформатора:

$$\begin{aligned} z_{k12} &= \sqrt{r_{k12}^2 + x_{k12}^2} [OM]; \\ z_{k13} &= \sqrt{r_{k13}^2 + x_{k13}^2} [OM]; \\ . &\quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \\ z_{k1n} &= \sqrt{r_{k1n}^2 + x_{k1n}^2} [OM]. \end{aligned}$$

Напряжение короткого замыкания двухобмоточного трансформатора

$$e_k \% = \frac{z_k I_1}{U_1} \cdot 100.$$

Напряжения короткого замыкания пар обмоток многообмоточного трансформатора:

$$e_{k12}\% = \frac{z_{k12}I_1}{U_1} \cdot 100,$$

$$e_{k13} \% = \frac{z_{k13} I_1}{U_1} \cdot 100,$$

• • • • •

$$e_{k1n}\% = \frac{z_{k1n}I_1}{U_1} \cdot 100,$$

где U_1 берется из задания, I_1 — из позиции 1, $r_k, r_{k12}, r_{k13}, \dots$ — из позиции 16, $x_k, x_{k12}, x_{k13}, \dots$ — из позиции 17.

В случае трехфазного трансформатора нужно правые части выражений для $e_k\%$, $e_{k12}\%$, $\dots$ умножить на $\sqrt{3}$.

19. Изменение напряжения трансформатора при нагрузке

Величина относительного изменения напряжения в двухобмоточных трансформаторах большой мощности обычно определяется по формуле

$$\Delta U\% = e_a \cos \varphi_2 + e_s \sin \varphi_2 + \frac{(e_s \cos \varphi_2 - e_a \sin \varphi_2)^2}{200};$$

при выводе этой формулы принято допущение $\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2$, что в мощных трансформаторах с относительно небольшим током холостого хода не вносит большой погрешности в вычисляемую по этой формуле величину $\Delta U\%$. В маломощных же трансформаторах, по условиям уменьшения стоимости их, величина намагничивающего тока достигает 40—50% от активной составляющей рабочего тока, поэтому приведенная выше формула для определения $\Delta U\%$ становится в этом случае весьма неточной. В этих трансформаторах величина $\Delta U\%$ более точно может быть определена по следующим формулам:

а) двухобмоточный трансформатор

$$\Delta U\% \approx e_{a1} \cos \varphi_1 + e_{a2} \cos \varphi_2 + e_{s1} \sin \varphi_1 + e_{s2} \sin \varphi_2,$$

б) многообмоточный трансформатор

$$\Delta U_{12}\% \approx e_{a1} \cos \varphi_1 + e_{a2} \cos \varphi_2 + e_{s1} \sin \varphi_1 + e_{s2} \sin \varphi_2,$$

$$\Delta U_{13}\% \approx e_{a1} \cos \varphi_1 + e_{a3} \cos \varphi_3 + e'_{s1} \sin \varphi_1 + e_{s3} \sin \varphi_3;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\Delta U_{1n}\% \approx e_{a1} \cos \varphi_1 + e_{an} \cos \varphi_n + e'_{s1} \sin \varphi_1 + e_{sn} \sin \varphi_n,$$

где $\cos \varphi_2, \cos \varphi_3, \dots$ берутся из задания, $\cos \varphi_1$ — из позиции 1, $e_{a1}, e_{a2}, e_{a3}, \dots$ — из позиции 16, $e_{s1}, e'_{s1}, e_{s2}, e_{s3}, \dots$ — из позиции 17.

Напряжения на зажимах вторичных обмоток трансформатора при номинальной нагрузке:

$$U_2 = U_1 \frac{W_2}{W_1} \left(1 - \frac{\Delta U_{12}\%}{100} \right),$$

$$U_3 = U_1 \frac{W_3}{W_1} \left(1 - \frac{\Delta U_{13}\%}{100} \right),$$

$$\dots \dots \dots U_n = U_1 \frac{W_n}{W_1} \left(1 - \frac{\Delta U_{1n}\%}{100} \right),$$

где U_1 берется из задания, $W_1, W_2, W_3, \dots$ — из позиции 5.

20. Проверка трансформатора на нагревание

Как показывают расчет и опыт, отдача тепла в окружающее пространство с открытых частей обмоток и сердечника маломощных трансформаторов в среднем составляет $13 \cdot 10^{-4} \text{ вт/см}^2$ при превышении температуры открытой поверхности трансформатора над температурой окружающей среды на 1°C . Тогда приближенно можно написать:

$$P_m \approx 13 \cdot 10^{-4} \theta_m^\circ S_{\text{обм}};$$

$$P_c \approx 13 \cdot 10^{-4} \theta_c^\circ S_{\text{сер}}.$$

Так как между обмотками и сердечником имеется достаточный тепловой обмен, то без большой погрешности практически можно считать:

$$\theta_m^\circ \approx \theta_c^\circ.$$

Следовательно, превышение температуры обмоток и сердечника трансформатора над температурой окружающей среды при указанном допущении приближенно можно определить по формуле

$$\theta \approx \frac{P_m + P_c}{13 \cdot 10^{-4} (S_{\text{обм}} + S_{\text{сер}})} + \Delta \theta^\circ [^\circ \text{C}],$$

где

P_m —суммарные потери в меди обмоток из позиции 11;

P_c —потери в стали сердечника из позиции 13;

$\Delta\theta^\circ$ —перепад температуры от внутренних слоев обмоток к наружным, который для пропитанных лаком обмоток приближенно может быть принят $10-15^\circ\text{C}$;

$S_{\text{сер}}$ —открытая поверхность сердечника трансформатора, см^2 ;

$S_{\text{обм}}$ —открытая поверхность обмоток трансформатора, см^2 .

Величина открытой поверхности сердечника однофазного и трехфазного трансформаторов стержневого типа (рис. 16) может быть определена по формуле

$$S_{\text{сер}} \approx 2(b_c + 2h_a)l_a + 4b_ch_a [\text{см}^2].$$

Для однофазного трансформатора броневого типа (рис. 16) эта поверхность будет:

$$S_{\text{сер}} \approx 2(b_c + 2h_a)l_a + 4(b_c + h_a)H + 4b_ch_a [\text{см}^2].$$

Величина открытой поверхности круглой катушки

$$S_{\text{обм}} \approx \pi D_{\text{нар}} H [\text{см}^2].$$

Для прямоугольной катушки

$$S_{\text{обм}} \approx 2[a_c + b_c + 4(\epsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3 + \dots)]H [\text{см}^2],$$

где

$$D_{\text{нар}} = a_c \sqrt{2} + 2(\epsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3) [\text{см}];$$

a_c , b_c и h_a берутся из позиции 4, H —из позиции 8, ϵ_0 , δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_{12} , δ_{23} , ... —из позиции 9, l_a —из позиции 12.

Суммарное значение полученного здесь превышения температуры обмоток трансформатора $\theta^\circ\text{C}$ вместе с температурой окружающей среды $\theta_0^\circ\text{C}$ не должно превосходить допустимой для маломощных трансформаторов величины $100-110^\circ\text{C}$, т. е.

$$\theta + \theta_0 \leq 100 + 110^\circ\text{C}.$$

21. Сводные данные расчета трансформатора

Вес стали сердечника, кг	G_c
Удельный расход стали, кг/кВА	G_c/P
Вес меди обмоток, кг	G_m
Удельный расход меди, кг/кВА	G_m/P
Отношение веса стали к весу меди	G_c/G_m
Потери в стали сердечника	P_c
» » меди обмоток	P_m
Отношение потерь в меди к потерям в стали	P_m/P_c
К.п.д. при номинальной нагрузке	η
Превышение температуры трансформатора над температурой окружающей среды	$\theta^\circ\text{C}$
Намагничивающий ток	I_μ
Относительное изменение напряжения при номинальной нагрузке	$\Delta U\%$

Анализируя полученные сводные данные, определяют необходимые изменения в расчете для полного удовлетворения всем техническим и экономическим требованиям. При выборе характера изменения исходных величин S_c , B_c и j можно воспользоваться приближенными соотношениями между основными параметрами трансформатора, приведенными ниже:

$$\begin{array}{lll}
 S'_c = \xi S_c; & B'_c = \zeta B_c; & j' = \psi j; \\
 G'_c \approx \xi G_c; & G'_c \approx G_c; & G'_c \approx G_c; \\
 P'_c \approx \xi P_c; & P'_c \approx \zeta^2 P_c; & P'_c \approx P_c; \\
 G'_M \approx \frac{G_M}{\xi}; & G'_M \approx \frac{G_M}{\zeta}; & G'_M \approx \frac{G_M}{\psi}; \\
 P'_M \approx \frac{P_M}{\xi}; & P'_M \approx \frac{P_M}{\zeta}; & P'_M \approx \psi P_M; \\
 \frac{G'_c}{G'_M} \approx \frac{G_c}{G_M} \xi^2; & \frac{G'_c}{G'_M} \approx \frac{G_c}{G_M} \zeta; & \frac{G'_c}{G'_M} \approx \frac{G_c}{G_M} \psi; \\
 \frac{P'_M}{P'_c} \approx \frac{P_M}{P_c} \frac{1}{\xi^2}; & \frac{P'_M}{P'_c} \approx \frac{P_M}{P_c} \frac{1}{\zeta^3}; & \frac{P'_M}{P'_c} \approx \frac{P_M}{P_c} \psi; \\
 I'_\mu \approx \xi I_\mu; & I'_\mu \approx \zeta^2 I_\mu; & I'_\mu \approx I_\mu; \\
 \theta^{\circ'} \approx \frac{\theta^{\circ}}{\xi}; & \theta^{\circ'} \approx \frac{\theta^{\circ}}{\zeta}; & \theta^{\circ'} \approx \psi \theta^{\circ}; \\
 \Delta U' \% \approx \frac{\Delta U \%}{\xi}; & \Delta U' \% \approx \frac{\Delta U \%}{\zeta}; & \Delta U' \% \approx \psi \Delta U \%; \\
 \eta \approx \frac{P}{P + \xi P_c + \frac{P_M}{\xi}}; & \eta \approx \frac{P}{P + \zeta^2 P_c + \frac{P_M}{\zeta}}; & \eta \approx \frac{P}{P + P_c + \psi P_M}.
 \end{array}$$

Пользуясь приближенными соотношениями, можно найти нужное изменение исходных значений S_c , B_c и j для окончательного варианта расчета трансформатора.

Следует заметить, что в целях экономии времени в первом варианте расчета могут не вычисляться следующие величины: r , e_a , e_s , x , z и $\Delta U\%$.

III. ПРИМЕР РАСЧЕТА МАЛОМОЩНОГО ОДНОФАЗНОГО ТРЕХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Задание

Число фаз $m=1$.

Номинальные мощности вторичных обмоток:

$$P_2 = 75 \text{ в.а.}, P_8 = 25 \text{ в.а.}$$

Номинальные напряжения:

$$U_1=127 \text{ в}, U_2=400 \text{ в} \text{ и } U_3=6 \text{ в},$$

Частота сети $f=50$ гц,

Коэффициенты мощности нагрузок:

$$\cos \varphi_2=1, \cos \varphi_3=1,$$

Особые условия: трансформатор минимальной стоимости для продолжительной нагрузки при окружающей температуре 50°C , исполнение—открытое, охлаждение—воздушное.

Выбор типа и основных соотношений трансформатора

В соответствии с условиями задания наиболее подходящим по конструкции является броневой тип трансформатора с сердечником из штампованных Ш-образных пластин. Отношение веса стали к весу меди примем $\alpha = \frac{G_c}{G_m} = 5,5$. В качестве материала сердечника можно принять электротехническую сталь марки Э41 с толщиной листа $\delta_c=0,5$ мм (ГОСТ 802-54),

1. Определение токов трансформатора

$$I_1 = \frac{P}{U_1 \eta \cos \varphi_1} = \frac{100}{127 \cdot 0,86 \cdot 0,89} = 1,03 \text{ а},$$

где суммарная активная мощность вторичных обмоток

$$P = P_2 \cos \varphi_2 + P_3 \cos \varphi_3 = 75 \cdot 1 + 25 \cdot 1 = 100 \text{ вт};$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_\mu}{I_{1a}}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,50^2}} = 0,89,$$

Принимаем:

$$I_{1p} \approx I_\mu \% \approx 50 \% \text{ от } I_{1a} \text{ или } I_\mu = 0,50 I_{1a} \text{ при } \cos \varphi_2=1 \text{ и } \cos \varphi_3=1;$$

$$\eta \approx 0,86 \text{—по кривой рис. 15;}$$

$$I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{75}{400} = 0,188 \text{ а}; I_3 = \frac{P_3}{U_3} = \frac{25}{6} = 4,14 \text{ а}.$$

2. Предварительное значение индукции в стержне:

$$B_c = 13\,000 \text{ гс}.$$

3. Предварительное значение плотности тока в проводах обмотки:

$$j = 3,8 \text{ а/мм}^2.$$

4. Поперечное сечение стержня сердечника:

$$S_c = C \sqrt{\frac{P_1 \alpha \cdot 10^8}{f B_{cl}}} = 0,7 \sqrt{\frac{130 \cdot 5,5 \cdot 10^8}{50 \cdot 13\,000 \cdot 3,8}} \approx 12,4 \text{ см}^2,$$

$$S_{\text{я}} = \frac{S_c}{2} = \frac{12,4}{2} = 6,2 \text{ см}^2,$$

где

$$P_1 = U_1 I_1 = 127 \cdot 1,03 = 130 \text{ в а.}$$

Соответственно полные поперечные сечения будут:

$$S'_c = \frac{S_c}{k_3} = \frac{12,4}{0,93} = 13,6 \text{ см}^2;$$

$$S'_{\text{я}} = \frac{S_{\text{я}}}{k_3} = \frac{6,2}{0,93} = 6,8 \text{ см}^2.$$

Принимаем:

$$a_c = 3 \text{ см}; b_c = \frac{S'_c}{a_c} = \frac{13,6}{3} = 4,5 \text{ см}; h_{\text{я}} = \frac{S'_{\text{я}}}{b_c} = \frac{6,8}{4,5} = 1,5 \text{ см}.$$

5. Число витков обмоток трансформатора

$$W'_1 = \frac{\left(U_1 - \frac{\Delta U \% \cdot U_1}{200} \right) 10^8}{4,44 f B'_c S_c} = \frac{\left(127 - \frac{10 \cdot 127}{200} \right) 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 13\,000 \cdot 12,4} = 330.$$

Предварительная величина падения напряжения в обмотках трансформатора при нагрузке по кривой рис. 15 $\Delta U \% \approx 10\%$:

$$e'_w = \frac{U_1 - \frac{\Delta U \% \cdot U_1}{200}}{W'_1} = \frac{127 - \frac{10 \cdot 127}{200}}{330} = 0,365 \text{ в/виток};$$

$$W'_2 = \frac{U_2 + \frac{\Delta U \% \cdot U_2}{200}}{e'_w} = \frac{400 + \frac{10 \cdot 400}{200}}{0,365} = 1150;$$

$$W'_3 = \frac{U_3 + \frac{\Delta U \% \cdot U_3}{200}}{e'_w} = \frac{6 + \frac{10 \cdot 6}{200}}{0,365} = 17.$$

Число витков низшего напряжения целое; окончательно принимаем:

$$B_c = 13\,000 \text{ гс}; W_1 = W'_1 = 330; W_2 = W'_2 = 1150;$$

$$W_3 = W'_3 = 17; e_w = e'_w = 0,365 \text{ в/виток}.$$

6. Сечения и диаметры проводов обмоток:

$$q'_1 = \frac{I_1}{j'_1} = \frac{1,03}{3,8} = 0,284 \text{ мм}^2;$$

$$q'_2 = \frac{I_2}{j'_2} = \frac{0,188}{3,8} = 0,0495 \text{ мм}^2;$$

$$q'_3 = \frac{I_3}{j'_3} = \frac{4,14}{3,8} = 1,095 \text{ мм}^2.$$

Ближайшие сечения и диаметры проводов по ГОСТ 2773-51 из приложения I:

$$q_1 = 0,273 \text{ мм}^2; \frac{d_1}{d_{1н}} = \frac{0,59}{0,64} \text{ мм};$$

$$q_2 = 0,0572 \text{ мм}^2; \frac{d_2}{d_{2н}} = \frac{0,27}{0,305} \text{ мм};$$

$$q_3 = 1,13 \text{ мм}^2; \frac{d_3}{d_{3н}} = \frac{1,2}{1,28} \text{ мм};$$

марка проводов ПЭЛ.

Окончательные значения плотностей тока в проводах:

$$j_1 = \frac{I_1}{q_1} = \frac{1,03}{0,273} = 3,75 \text{ а/мм}^2; j_2 = \frac{I_2}{q_2} = \frac{0,188}{0,0572} = 3,3 \text{ а/мм}^2;$$

$$j_3 = \frac{I_3}{q_3} = \frac{4,14}{1,13} = 3,68 \text{ а/мм}^2.$$

7. Изоляция проводов по ГОСТ 2773-51—марка ПЭЛ.

8. Высота окна сердечника трансформатора

$$H \approx \sqrt{k \frac{q_1 W_1 + q_2 W_2 + q_3 W_3}{100 k_0}} =$$

$$= \sqrt{2,8 \cdot \frac{0,273 \cdot 330 + 0,0572 \cdot 1150 + 1,13 \cdot 17}{100 \cdot 0,24}} = 4,5 \text{ см.}$$

9. Ширина окна сердечника трансформатора (рис. 19):

число витков первичной обмотки в слое

$$n_1 = \frac{H - 2\epsilon_1}{d_{1н}} = \frac{45 - 2 \cdot 3}{0,64} = 61;$$

число слоев этой обмотки

$$m_1 = \frac{W_1}{n_1} = \frac{330}{61} = 5,5 \approx 6;$$

толщина первичной обмотки

$$\delta_1 = m_1 d_{1н} = 6 \cdot 0,64 = 3,8 \text{ мм};$$

число витков второй обмотки в слое:

$$n_2 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{2н}} = \frac{45 - 2 \cdot 3}{0,305} = 125;$$

число слоев этой обмотки

$$m_2 = \frac{W_2}{n_2} = \frac{1150}{125} = 9,3 \approx 10;$$

толщина второй обмотки

$$\delta_2 = m_2 (d_{2н} + \gamma_2) = 10 (0,305 + 0,05) = 3,5 \text{ мм};$$

число витков третьей обмотки в слое

$$n_3 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{3н}} = \frac{45 - 2 \cdot 3}{1,28} = 30;$$

число слоев этой обмотки

$$m_3 = \frac{W_3}{n_3} = \frac{17}{30} \approx 1;$$

толщина третьей обмотки

$$\delta_3 = m_3 d_{3н} = 1 \cdot 1,28 \approx 1,3 \text{ мм}.$$

Ширина окна сердечника

$$b = k_2 (\varepsilon_0 + \delta_2 + \delta_{12} + \delta_1 + \delta_{13} + \delta_3) + \varepsilon_3 = 1,2 \times \\ \times (1 + 3,5 + 0,5 + 3,8 + 0,5 + 1,3) + 3 \approx 15 \text{ мм},$$

где принято:

$$\varepsilon_3 = 3 \text{ мм}; \quad \varepsilon_0 = 1 \text{ мм}; \quad \delta_{12} = \delta_{13} = 0,5 \text{ мм} \text{—электрокартон ЭВ} \\ (\text{ГОСТ 2824-45}); \quad k_2 = 1,2.$$

Отношение

$$\frac{H}{b} = \frac{4,5}{1,5} = 3.$$

Сердечник может быть собран из Ш-образных пластин без-отходной штамповки согласно приложению II:

$$H = 4,5 \text{ см}; \quad b = 1,5 \text{ см}; \quad a_c = 3 \text{ см}; \quad b_c = 4,5 \text{ см}; \quad h_a = 1,5 \text{ см}.$$

10. Вес меди обмоток трансформатора:

$$G_{м1} = 8,9 W_1 q_1 l_{w1} \cdot 10^{-5} = 8,9 \cdot 330 \cdot 0,273 \cdot 20,3 \cdot 10^{-5} = 0,163 \text{ кг};$$

$$l_{w1} = 2 [a_c + b_c + 4 (\varepsilon_0 + \delta_2 + \delta_{12}) + 2\delta_1] = 2 [3 + 4,5 + 4 \times \\ \times (0,1 + 0,35 + 0,05) + 2 \cdot 0,38] \approx 20,3 \text{ см};$$

$$G_{м2} = 8,9 W_2 q_2 l_{w2} \cdot 10^{-5} = 8,9 \cdot 1150 \cdot 0,0572 \cdot 17,2 \cdot 10^{-5} = 0,100 \text{ кг};$$

$$l_{w2} = 2 (a_c + b_c + 4\varepsilon_0 + 2\delta_2) = 2 (3 + 4,5 + 4 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,35) \approx 17,2 \text{ см};$$

$$G_{м3} = 8,9 W_3 q_3 l_{w3} \cdot 10^{-5} = 8,9 \cdot 17 \cdot 1,13 \cdot 22,7 \cdot 10^{-5} = 0,039 \text{ кг};$$

$$l_{w3} = 2 [a_c + b_c + 4 (\varepsilon_0 + \delta_2 + \delta_{12} + \delta_1 + \delta_{13}) + 2\delta_3] = \\ = 2 [3 + 4,5 + 4 (0,1 + 0,35 + 0,05 + 0,38 + 0,05) + \\ + 2 \cdot 0,13] = 22,7 \text{ см},$$

Полный вес меди обмоток

$$G_m = G_{m1} + G_{m2} + G_{m3} = 0,163 + 0,100 + 0,039 = 0,302 \text{ кг.}$$

11. Потери в меди обмоток трансформатора при 75°C :

$$P_{m1} = 2,4 f_1^2 G_{m1} = 2,4 \cdot 3,75^2 \cdot 0,163 = 5,50 \text{ Вт};$$

$$P_{m2} = 2,4 f_2^2 G_{m2} = 2,4 \cdot 3,3^2 \cdot 0,100 = 2,62 \text{ Вт};$$

$$P_{m3} = 2,4 f_3^2 G_{m3} = 2,4 \cdot 3,68^2 \cdot 0,039 = 1,27 \text{ Вт.}$$

Суммарные потери в меди

$$P_m = P_{m1} + P_{m2} + P_{m3} = 5,50 + 2,62 + 1,27 \approx 9,4 \text{ Вт.}$$

12. Вес стали сердечника трансформатора:

$$G_{cc} = 7,8 H S_c \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot 4,5 \cdot 12,4 \cdot 10^{-3} = 0,44 \text{ кг};$$

$$G_{cя} = 2 \cdot 7,8 (H + l_{я}) S_{я} \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 7,8 (4,5 + 9) 6,2 \cdot 10^{-3} = 1,32 \text{ кг};$$

$$l_{я} = 2b + a_c + 2h_{я} = 2 \cdot 1,5 + 3 + 2 \cdot 1,5 = 9 \text{ см.}$$

Полный вес сердечника

$$G_c = G_{cc} + G_{cя} = 0,44 + 1,32 = 1,76 \text{ кг.}$$

13. Потери в стали сердечника трансформатора

$$P_{cc} = k_c \left(\frac{B_c}{10\,000} \right)^2 G_{cc} = 1,6 \left(\frac{13\,000}{10\,000} \right)^2 0,44 = 1,2 \text{ Вт};$$

$$P_{cя} = k_c \left(\frac{B_{я}}{10\,000} \right)^2 G_{cя} = 1,6 \left(\frac{13\,000}{10\,000} \right)^2 1,32 = 3,67 \text{ Вт.}$$

Полные потери в стали сердечника

$$P_c = P_{cc} + P_{cя} = 1,2 + 3,67 = 4,87 \text{ Вт.}$$

14. Ток холостого хода трансформатора:

$$\begin{aligned} I_0 \approx I_\mu &= \frac{a\omega_c l'_c + a\omega_{я} l'_{я} + 0,8 B_c n \delta_3}{\sqrt{2} W_1} = \\ &= \frac{7,4 \cdot 4,5 + 7,4 \cdot 13,5 + 0,8 \cdot 13\,000 \cdot 2 \cdot 0,004}{\sqrt{2} \cdot 330} = 0,465 \text{ а,} \end{aligned}$$

где

$$l'_c = H = 4,5 \text{ см}; \quad l'_{я} = H + l_{я} = 4,5 + 9 = 13,5 \text{ см}$$

$$\text{при } B_c = B_{я} = 13\,000 \text{ гс};$$

$a\omega_c = a\omega_{я} = 7,4$ — по кривой рис. 41 для стали марки Э41;

$$i_\mu \% = \frac{I_\mu}{I_{1a}} \cdot 100 = \frac{0,465}{0,92} \cdot 100 = 50\%;$$

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1 = 1,03 \cdot 0,89 = 0,92 \text{ а.}$$

15. Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{P}{P + P_c + P_m} \cdot 100 = \frac{100}{100 + 4,87 + 9,4} \cdot 100 \approx 88\%.$$

16. Активные падения напряжения и сопротивления обмоток трансформатора:

относительные активные падения напряжения в обмотках

$$\begin{aligned} e_{a1}\% &= \frac{P_{M1}}{U_1 I_1} \cdot 100 = \frac{5,50}{127 \cdot 1,03} \cdot 100 = 4,20\%; \\ e_{a2}\% &= \frac{P_{M2}}{U_2 I_2} \cdot 100 = \frac{2,62}{400 \cdot 0,188} \cdot 100 = 3,50\%; \\ e_{a3}\% &= \frac{P_{M3}}{U_3 I_3} \cdot 100 = \frac{1,27}{6 \cdot 4,14} \cdot 100 = 5,07\%; \end{aligned}$$

активные сопротивления обмоток

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{P_{M1}}{I_1^2} = \frac{5,50}{1,03^2} = 5,2 \text{ ом}; & r_2 &= \frac{P_{M2}}{I_2^2} = \frac{2,62}{0,188^2} = 74,3 \text{ ом}; \\ r_3 &= \frac{P_{M3}}{I_3^2} = \frac{1,27}{4,14^2} = 0,075 \text{ ом}; \end{aligned}$$

активные сопротивления короткого замыкания обмоток:

$$\begin{aligned} r_{K12} &= r_1 + r_2' = r_1 + r_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 = 5,2 + 74,3 \left(\frac{330}{1150} \right)^2 = 11,3 \text{ ом}; \\ r_{K13} &= r_1 + r_3' = r_1 + r_3 \left(\frac{W_1}{W_3} \right)^2 = 5,2 + 0,075 \left(\frac{330}{17} \right)^2 = 8,0 \text{ ом}. \end{aligned}$$

17. Индуктивные падения напряжения и сопротивления обмоток трансформатора:

относительные индуктивные падения напряжения соответствующих пар обмоток при расположении первичной обмотки между двумя вторичными (рис. 19):

$$\begin{aligned} e_{s12}\% &= \frac{4f\delta_{s12} \left(I_1 W_1 l_{w1} + I_2 W_2 l_{w2} \frac{P_1}{P_2} \right) 10^{-6}}{e_w l_s} = \\ &= \frac{4 \cdot 50 \cdot 0,293 \left(1,03 \cdot 330 \cdot 20,3 + 0,188 \cdot 1150 \cdot 17,2 \cdot \frac{130}{75} \right) 10^{-6}}{0,365 \cdot 4,5} = 0,48\%; \\ \delta_{s12} &= \delta_{12} + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} = 0,05 + \frac{0,38 + 0,35}{3} = 0,293 \text{ см}; \\ e_{s13}\% &= \frac{4f\delta_{s13} \left(I_1 W_1 l_{w1} + I_3 W_3 l_{w3} \frac{P_1}{P_3} \right) 10^{-6}}{e_w l_s} = \\ &= \frac{4 \cdot 50 \cdot 0,22 \left(1,03 \cdot 330 \cdot 20,3 + 4,14 \cdot 17 \cdot 22,7 \cdot \frac{130}{25} \right) 10^{-6}}{0,365 \cdot 4,5} = 0,43\%; \end{aligned}$$

$$\delta_{s13} = \delta_{13} + \frac{\delta_1 + \delta_3}{3} = 0,05 + \frac{0,38 + 0,13}{3} = 0,22 \text{ см};$$

$$e_{s23} \% = \frac{4f\delta_{s23} \left(I_2 W_2 l_{w2} \cdot \frac{P_1}{P_2} + I_3 W_3 l_{w3} \cdot \frac{P_1}{P_3} \right) 10^{-6}}{e_w l_s} =$$

$$= \frac{4 \cdot 50 \cdot 0,64 \left(0,188 \cdot 1150 \cdot 17,2 \cdot \frac{130}{75} + 4,14 \cdot 17 \cdot 22,7 \cdot \frac{130}{25} \right) 10^{-6}}{0,365 \cdot 4,5} = 1,19 \%;$$

$$\delta_{s23} = \delta_{12} + \delta_1 + \delta_{13} + \frac{\delta_2 + \delta_3}{3} = 0,05 + 0,38 + 0,05 +$$

$$+ \frac{0,35 + 0,13}{3} = 0,64 \text{ см};$$

здесь

$$P_1 = U_1 I_1 = 127 \cdot 1,03 = 130 \text{ вa}; \quad l_s \approx H = 4,5 \text{ см.}$$

Индуктивные падения напряжения отдельных обмоток:

а) пара обмоток 1 и 2

$$e_{s1} \% = \frac{4f\delta_{s12} I_1 W_1 l_{w1} \cdot 10^{-6}}{e_w l_s} = \frac{4 \cdot 50 \cdot 0,293 \cdot 1,03 \cdot 330 \cdot 20,3 \cdot 10^{-6}}{0,365 \cdot 4,5} = 0,25 \%;$$

$$e_{s2} \% = e_{s12} \% - e_{s1} \% = 0,48 - 0,25 = 0,23 \%;$$

б) пара обмоток 1 и 3

$$e'_{s1} \% = \frac{4f\delta_{s13} I_1 W_1 l_{w1} \cdot 10^{-6}}{e_w l_s} = \frac{4 \cdot 50 \cdot 0,22 \cdot 1,03 \cdot 330 \cdot 20,3 \cdot 10^{-6}}{0,365 \cdot 4,5} = 0,19 \%;$$

$$e_{s3} \% = e_{s13} \% - e'_{s1} \% = 0,43 - 0,19 = 0,24 \%.$$

Индуктивные сопротивления короткого замыкания пар обмоток:

$$x_{k12} = x_1 + x_2' = \frac{e_{s12} \% \cdot U_1}{100 I_1} = \frac{0,48 \cdot 127}{100 \cdot 1,03} \approx 0,59 \text{ ом};$$

$$x_{k13} = x_1' + x_3' = \frac{e_{s13} \% \cdot U_1}{100 I_1} = \frac{0,43 \cdot 127}{100 \cdot 1,03} = 0,53 \text{ ом}.$$

Полные сопротивления короткого замыкания пар обмоток:

$$z_{k12} = \sqrt{r_{k12}^2 + x_{k12}^2} = \sqrt{11,3^2 + 0,59^2} \approx 11,3 \text{ ом};$$

$$z_{k13} = \sqrt{r_{k13}^2 + x_{k13}^2} = \sqrt{8,0^2 + 0,53^2} \approx 8,0 \text{ ом}.$$

Напряжения короткого замыкания пар обмоток

$$e_{k12} \% = \frac{z_{k12} I_1}{U_1} \cdot 100 = \frac{11,3 \cdot 1,03}{127} \cdot 100 = 9,15 \%;$$

$$e_{k13} \% = \frac{z_{k13} I_1}{U_1} \cdot 100 = \frac{8,0 \cdot 1,03}{127} \cdot 100 = 6,5 \%.$$

18. Изменения напряжения трансформатора при нагрузке:

$$\Delta U_{12}\% \approx e_{a1} \cos \varphi_1 + e_{a2} \cos \varphi_2 + e_{s1} \sin \varphi_1 + e_{s2} \sin \varphi_2 = \\ = 4,20 \cdot 0,89 + 3,5 \cdot 1 + 0,25 \cdot 0,16 + 0 \approx 7,20\%;$$

$$\Delta U_{13}\% \approx e_{a1} \cos \varphi_1 + e_{a3} \cos \varphi_3 + e'_{s1} \sin \varphi_1 + e_{s3} \sin \varphi_3 = \\ = 4,20 \cdot 0,89 + 5,07 \cdot 1 + 0,19 \cdot 0,16 + 0 \approx 8,84\%.$$

Влияние индуктивного падения напряжения на величину изменения напряжения весьма незначительно.

Напряжение на зажимах вторичных обмоток при нагрузке:

$$U_2 = U_1 \frac{W_2}{W_1} \left(1 - \frac{\Delta U_{12}\%}{100} \right) = 127 \cdot \frac{1150}{330} \left(1 - \frac{7,20}{100} \right) = 408 \text{ в};$$

$$U_3 = U_1 \frac{W_3}{W_1} \left(1 - \frac{\Delta U_{13}\%}{100} \right) = 127 \cdot \frac{17}{330} \left(1 - \frac{8,84}{100} \right) = 6 \text{ в}.$$

Для получения номинального напряжения при нагрузке на зажимах второй обмотки число витков ее следует уменьшить до $W_2 = 1150 - \frac{408 - 400}{0,365} = 1150 - 22 = 1128$.

19. Проверка трансформатора на нагревание

$$\theta \approx \frac{P_M + P_c}{13 \cdot 10^{-4} (S_{обм} + S_{сер})} + \Delta \theta = \frac{9,4 + 4,87}{13 \cdot 10^{-4} (104 + 270)} + 12 \approx 42^\circ \text{ C},$$

где

$$S_{обм} = 2 [a_c + b_c + 4 (\epsilon_0 + \delta_2 + \delta_{12} + \delta_1 + \delta_{13} + \delta_3)] H = \\ = 2 [3 + 4,5 + 4 (0,1 + 0,35 + 0,05 + 0,38 + 0,05 + \\ + 0,13)] 4,5 \approx 104 \text{ см}^2;$$

$$S_{сер} = 2 (b_c + 2h_{я}) l_{я} + 4 (b_c + h_{я}) H + 4 b_c h_{я} = \\ = 2 (4,5 + 2 \cdot 1,5) 9 + 4 (4,5 + 1,5) 4,5 + 4 \cdot 4,5 \cdot 1,5 \approx 270 \text{ см}^2.$$

Температура нагрева трансформатора будет:

$$\theta_T = \theta + \theta_0 = 42 + 50 = 92^\circ \text{ C}.$$

20. Сводные данные:

Вес стали сердечника	1,76 кг
Удельный расход стали	17,6 кг/ква
Вес меди обмоток	0,302 кг
Удельный расход меди	3,02 кг/ква
Отношение веса стали к весу	5,8
Потери в стали сердечника	4,87 вт
» » меди обмоток	9,4 вт
Отношение потерь в меди к потерям в стали	2,07
К.п.д.	88 %
Превышение температуры	42° C
Намагничивающий ток	50 %
Относительное изменение напряжения	$\Delta U_{12}\% = 7,20\%$ $\Delta U_{13}\% = 8,84\%$

МАЛОМОЩНЫЕ СИЛОВЫЕ АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Автотрансформатор отличается от трансформатора тем, что он имеет одну обмотку, часть которой одновременно принадлежит первичной и вторичной цепям (рис. 20). Ввиду этого передача мощности в автотрансформаторе из первичной цепи во вторичную происходит электрическим и магнитным путями. В конструктивном отношении различия между автотрансформатором и трансформатором практически не существует.

Если пренебречь потерями и намагничивающим током, то полная мощность вторичной цепи автотрансформатора практически будет:

$$P_2 = U_2 I_2 \approx U_1 I_1;$$

для случая

$$k = \frac{W_1 + W_2}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_2} > 1:$$

$$\begin{aligned} P_2 = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_{2f}) &= U_2 I_1 + U_2 I_{2f} = U_2 I_2 \frac{1}{k} + \\ &+ U_2 I_2 \frac{k-1}{k} = P_9 + P_{2f}; \end{aligned}$$

для случая

$$k' = \frac{W_1}{W_1 + W_2} \approx \frac{U_1}{U_2} < 1:$$

$$\begin{aligned} P_2 = U_2 I_2 = U_1 I_1 = U_1 (I_2 + I_1') &= U_1 I_2 + U_1 I_1' = \\ &= U_2 I_2 k' + U_2 I_2 (1 - k') = P_9 + P_{2f}. \end{aligned}$$

В понижающем автотрансформаторе магнитным путем из первичной цепи во вторичную поступает мощность $P_{2f} = U_2 I_2 \frac{k-1}{k}$, а электрическим путем мощность $P_9 = U_2 I_2 \frac{1}{k}$; в повышающем автотрансформаторе — соответственно

$$P_{2f} = U_2 I_2 (1 - k') \text{ и } P_9 = U_2 I_2 k'.$$

Основные размеры автотрансформатора и его потери определяются мощностью P_{2f} , называемой расчетной мощностью автотрансформатора.

Величина расчетной мощности P_{2t} при общей заданной мощности вторичной цепи $P_2 = U_2 I_2$ будет тем меньше, чем ближе коэффициент трансформации автотрансформатора к единице. С уменьшением расчетной мощности уменьшаются размеры и потери автотрансформатора.

Автотрансформатор выгодно применять в тех случаях, когда коэффициент трансформации близок к единице, так как

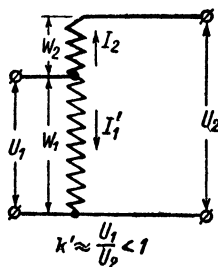
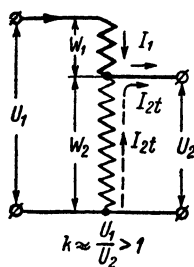


Рис. 20. Схемы автотрансформатора

при этом расчетная мощность его P_{2t} мала по сравнению с заданной мощностью P_2 , а следовательно, размеры, вес, стоимость и потери его значительно меньше аналогичных данных трансформатора той же мощности.

Автотрансформаторы часто выполняются с секционированной обмоткой, что позволяет использовать их

для подбора и регулирования напряжения различных устройств.

Расчет маломощных автотрансформаторов мало отличается от изложенного выше расчета маломощных трансформаторов.

II. РАСЧЕТ МАЛОМОЩНЫХ ОДНОФАЗНЫХ И ТРЕХФАЗНЫХ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

Исходными данными для расчета маломощных силовых автотрансформаторов являются следующие величины:

- число фаз m ;
- номинальная мощность вторичной цепи P_2 [ва];
- номинальные напряжения U_1 и U_2 [в];
- частота сети f [гц];
- коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_2$.

В случае автотрансформатора с секционированной обмоткой должны быть заданы вторичные мощности, напряжения и коэффициенты мощности нагрузок

отдельных секций— $P_2, P_3, \dots, P_n$; $U_a, U_c, \dots, U_n$ и $\cos \varphi_2, \cos \varphi_3, \dots, \cos \varphi_n$ (рис. 21).

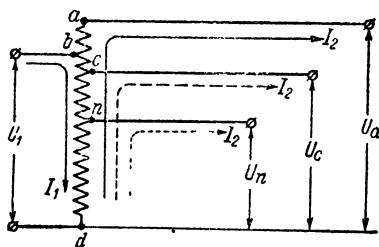


Рис. 21. Схема секционированного автотрансформатора

1. Расчетная мощность автотрансформатора

Как указывалось выше, во вторичную цепь автотрансформатора мощность передается магнитным и электрическим путями. Основные же размеры автотрансформатора определяются

величиной мощности P_{2t} , передаваемой во вторичную цепь магнитным путем. Величина этой расчетной мощности будет:

$$P_{2t} \approx P_2 \left(\frac{k-1}{k} \right) \text{ — в случае понижающего автотрансформатора,}$$

когда

$$k = \frac{W_1 + W_2}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_2} > 1;$$

$$P_{2t} \approx P_2 (1 - k') \text{ — в случае повышающего автотрансформатора, когда}$$

$$k' = \frac{W_1}{W_1 + W_2} \approx \frac{U_1}{U_2} < 1,$$

где $P_2 = U_2 I_2$ — мощность вторичной цепи по заданию, *ва*;
 W_1 и W_2 — числа витков отдельных частей обмоток (рис. 20).

В случае автотрансформатора с секционированной обмоткой величину P_{2t} следует вычислять для всех коэффициентов трансформации, причем полученные результаты целесообразно свести в табл. 2.

Таблица

k	P	P_{2t}	Примечание
U_1/U_a	P_2		
U_1/U_c	P_3		
...	...	...	...
U_1/U_n	P_n		

2. Определение токов автотрансформатора

Величины токов первичной и вторичной цепей для разных коэффициентов трансформации автотрансформатора могут быть определены по формулам:

а) однофазный автотрансформатор (рис. 21)

для $k_a = \frac{U_1}{U_a}$:

первичный ток, активная и реактивная составляющие первичного тока:

$$I_{1r} = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{U_1 \eta \cos \varphi_1}; \quad I_{1a} = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{U_1 \eta}; \quad I_{1p} = I_\mu + \frac{P_2 \sin \varphi_2}{U_1 \eta};$$

вторичный ток, активная и реактивная составляющие вторичного тока:

$$I_2 = \frac{P_2}{U_a}; \quad I_{2a} = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{U_a}; \quad I_{2p} = \frac{P_2 \sin \varphi_2}{U_a};$$

для $k_c = \frac{U_1}{U_c}$:

$$I_1 = \frac{P_3 \cos \varphi_3}{U_{1\eta} \cos \varphi_1}; \quad I_{1a} = \frac{P_3 \cos \varphi_3}{U_{1\eta}}; \quad I_{1p} = I_\mu + \frac{P_3 \sin \varphi_3}{U_{1\eta}};$$

$$I_2 = \frac{P_3}{U_c}; \quad I_{2a} = \frac{P_3 \cos \varphi_3}{U_c}; \quad I_{2p} = \frac{P_3 \sin \varphi_3}{U_c};$$

.

для $k_n = \frac{U_1}{U_n}$:

$$I_1 = \frac{P_n \cos \varphi_n}{U_{1\eta} \cos \varphi_1}; \quad I_{1a} = \frac{P_n \cos \varphi_n}{U_{1\eta}}; \quad I_{1p} = I_\mu + \frac{P_n \sin \varphi_n}{U_{1\eta}};$$

$$I_2 = \frac{P_n}{U_n}; \quad I_{2a} = \frac{P_n \cos \varphi_n}{U_n}; \quad I_{2p} = \frac{P_n \sin \varphi_n}{U_n}.$$

б) трехфазный автотрансформатор

для $k_a = \frac{U_1}{U_a}$:

$$I_1 = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3} U_{1\eta} \cos \varphi_1}; \quad I_{1a} = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3} U_{1\eta}}; \quad I_{1p} = \frac{I_{\mu 1} + 2I_{\mu 2}}{3} + \frac{P_2 \sin \varphi_2}{\sqrt{3} U_{1\eta}};$$

$$I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} U_a}; \quad I_{2a} = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3} U_a}; \quad I_{2p} = \frac{P_2 \sin \varphi_2}{\sqrt{3} U_a};$$

для $k_c = \frac{U_1}{U_c}$:

$$I_1 = \frac{P_3 \cos \varphi_3}{\sqrt{3} U_{1\eta} \cos \varphi_1}; \quad I_{1a} = \frac{P_3 \cos \varphi_3}{\sqrt{3} U_{1\eta}}; \quad I_{1p} = \frac{I_{\mu 1} + 2I_{\mu 2}}{3} + \frac{P_3 \sin \varphi_3}{\sqrt{3} U_{1\eta}};$$

$$I_2 = \frac{P_3}{\sqrt{3} U_c}; \quad I_{2a} = \frac{P_3 \cos \varphi_3}{\sqrt{3} U_c}; \quad I_{2p} = \frac{P_3 \sin \varphi_3}{\sqrt{3} U_c};$$

.

для $k_n = \frac{U_1}{U_n}$:

$$I_1 = \frac{P_n \cos \varphi_n}{\sqrt{3} U_{1\eta} \cos \varphi_1}; \quad I_{1a} = \frac{P_n \cos \varphi_n}{\sqrt{3} U_{1\eta}}; \quad I_{1p} = \frac{I_{\mu 1} + 2I_{\mu 2}}{3} + \frac{P_n \sin \varphi_n}{\sqrt{3} U_{1\eta}};$$

$$I_2 = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n}; \quad I_{2a} = \frac{P_n \cos \varphi_n}{\sqrt{3} U_n}; \quad I_{2p} = \frac{P_n \sin \varphi_n}{\sqrt{3} U_n},$$

где $P_2, P_3, \dots, P_n$; $U_a, U_c, \dots, U_n$; $\cos \varphi_2, \cos \varphi_3, \dots, \cos \varphi_n$ — мощности, напряжения и коэффициенты мощности вторичных цепей по заданию;

I_μ —намагничивающий ток автотрансформатора, который предварительно может быть принят:

$I_\mu \% \approx (40 \div 50) \frac{P_{2t}}{P_2} \%$ от величины активной составляющей первичного тока;

$I_{\mu 1}$ и $I_{\mu 2}$ —намагничивающие токи в средней и крайних фазах трехфазного автотрансформатора;

η —предварительное значение к. п. д. автотрансформатора, величина которого приближенно вычисляется по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \left(\frac{1 - \eta_{2t}}{\eta_{2t}} \right) P_{2t}};$$

η_{2t} —к. п. д. трансформатора мощностью, равной расчетной мощности автотрансформатора P_{2t} , может быть ориентировочно взят по кривой рис. 15;

$\cos \varphi_1$ —коэффициент мощности первичной цепи, определяемый, как и в маломощных трансформаторах, по позиции 1 главы первой.

Полученные значения токов для всех коэффициентов трансформации удобно свести в табл. 3.

Таблица 3

k	P	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	I_2	I_{2a}	I_{2p}	I_1	I_{1a}	I_{1p}	$\cos \varphi_1$	η	Примечание
По заданию				Вычисляются								
U_1/U_a												
U_1/U_c												
...	..	..	...	..	..	..	..	..	..	..	..	
U_1/U_n												

В том случае, когда U_2 отличается от U_1 не более чем на 25 %, нагрузка вторичной цепи активная, а величина мощности P_{2t} не менее 50—75 *ва*, можно при определении первичных токов автотрансформатора с достаточной точностью практически положить $\cos \varphi_1$ и η равными единице.

3. Определение токов отдельных частей обмотки автотрансформатора

Величина токов отдельных частей обмотки автотрансформатора может быть определена методом наложения вторичной цепи на первичную. В случае автотрансформатора с секционированной обмоткой определение токов отдельных частей обмотки следует производить при всех коэффициентах трансформации (рис. 21).

В соответствии с рис. 21 величина токов в отдельных частях обмотки автотрансформатора может быть определена по формулам:

а) при $k_a \approx \frac{U_1}{U_a}$:

$$I_{ab} = I_2; \quad I_{bd} = I_1 - I_2 = \sqrt{(I_{1a} - I_{2a})^2 + (I_{1p} - I_{2p})^2};$$

б) при $k_c \approx \frac{U_1}{U_c}$:

$$I_{ab} = 0; \quad I_{bc} = I_1; \quad I_{cd} = I_2 - I_1 = \sqrt{(I_{2a} - I_{1a})^2 + (I_{2p} - I_{1p})^2};$$

в) при $k_n \approx \frac{U_1}{U_n}$:

$$I_{ab} = 0; \quad I_{bn} = I_1; \quad I_{dn} = I_2 - I_1 = \sqrt{(I_{2a} - I_{1a})^2 + (I_{2p} - I_{1p})^2},$$

где $I_1, I_{1a}, I_{1p}, I_2, I_{2a}, I_{2p}$ — полные, активные и реактивные составляющие токов первичных и вторичных цепей из табл. 3 позиции 2.

Вычисленные значения токов отдельных частей обмотки автотрансформатора удобно свести в табл. 4.

Таблица 4

k	$\frac{U_1}{U_a}$	$\frac{U_1}{U_c}$	...	$\frac{U_1}{U_n}$	Примечание
I_{ab}					
I_{bc}					
I_{cd}					
...	...	...	...	...	
I_{dn}					

4. Выбор индукции в стержне сердечника автотрансформатора

Выбор величины индукции в стержне сердечника маломощного автотрансформатора производится так же, как и в маломощных трансформаторах, по позиции 2 главы первой.

5. Выбор плотности тока в проводах обмотки автотрансформатора

Выбор плотности тока в обмотках автотрансформаторов определяется теми же условиями, как и у маломощного трансформатора, по позиции 3 главы первой. При выборе плотности тока в обмотке автотрансформатора необходимо руководствоваться его расчетной мощностью P_{2t} .

В автотрансформаторах с расчетной мощностью P_{2t} примерно до 100 *ва* допускаемая плотность тока в проводах обмотки может составлять:

$$j = 4,5 \div 3,5 \text{ а/мм}^2.$$

В автотрансформаторах с расчетной мощностью P_{2t} свыше 100 *ва* и до нескольких сотен вольтампер эта плотность обычно составляет:

$$j = 3,5 \div 2,5 \text{ а/мм}^2.$$

При температуре окружающей среды 50—60° С следует выбирать низкие пределы плотности тока.

6. Определение поперечного сечения стержня и ярма сердечника автотрансформатора

Определение поперечных сечений стержня S_c и ярма S_y сердечника автотрансформатора производится так же, как и в маломощных трансформаторах, по позиции 4 главы первой, с тем отличием, что в формулу для определения сечения стержня S_c вместо P_1 ставится расчетная мощность автотрансформатора P_{2t} и коэффициент C в формуле должен быть увеличен на 15—20%.

7. Определение числа витков обмотки автотрансформатора

В маломощных автотрансформаторах величина падения напряжения в обмотке при нагрузке меньше, чем в аналогичных трансформаторах, примерно в отношении $\frac{P_{2t}}{P_2}$, поэтому при определении числа витков обмотки автотрансформатора можно без большой погрешности пренебречь падением напряжения в ней и вычислять их по формулам:

а) для однофазного автотрансформатора (рис. 21)

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot 10^3}{4,44 f B_c S_c}; \quad e_w = \frac{U_1}{W_1} [\text{в/виток}];$$

$$W_{ab} = \frac{U_{ab}}{e_w}; \quad W_{bc} = \frac{U_{bc}}{e_w}; \quad W_{cn} = \frac{U_{cn}}{e_w};$$

.....

$$W_{nd} = \frac{U_{nd}}{e_w};$$

б) для трехфазного автотрансформатора

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 4,44 f B_c S_c}; \quad e_w = \frac{U_1}{\sqrt{3} W_1} [\text{в/виток}];$$

$$W_{ab} = \frac{U_{ab}}{e_w}; \quad W_{bc} = \frac{U_{bc}}{e_w}; \quad W_{cn} = \frac{U_{cn}}{e_w};$$

.....

$$W_{nd} = \frac{U_{nd}}{e_w}.$$

8. Определение сечения и диаметра проводов обмотки

Предварительные значения поперечных сечений проводов отдельных участков обмотки трансформатора (рис. 21) определяются по формулам:

$$q'_{ab} = \frac{I_{ab}}{I'_{ab}} [\text{мм}^2]; \quad q'_{bc} = \frac{I_{bc}}{j'_{bc}} [\text{мм}^2];$$

$$q'_{cn} = \frac{I_{cn}}{j'_{cn}} [\text{мм}^2]; \quad q'_{nd} = \frac{I_{nd}}{j'_{nd}} [\text{мм}^2],$$

где I_{ab} , I_{bc} , I_{cn} , I_{nd} берутся из табл. 4 позиции 3, а j'_{ab} , j'_{bc} , j'_{cn} , j'_{nd} — из позиции 5 главы второй.

Окончательные значения поперечных сечений и диаметров проводов выбираются по ближайшим данным ГОСТ из приложения I:

$$q_{ab} = \dots \text{мм}^2; \quad \frac{d_{ab}}{d_{abn}} = \dots \text{мм};$$

$$q_{bc} = \dots \text{мм}^2; \quad \frac{d_{bc}}{d_{bcn}} = \dots \text{мм};$$

$$q_{cn} = \dots \text{мм}^2; \quad \frac{d_{cn}}{d_{cnn}} = \dots \text{мм};$$

$$q_{nd} = \dots \text{мм}^2; \quad \frac{d_{nd}}{d_{ndn}} = \dots \text{мм}.$$

По выбранным окончательно сечениям проводов уточняются плотности тока в проводах обмотки для всех коэффициентов трансформации:

$$j_{ab} = \frac{I_{ab}}{q_{ab}} \dots \text{а/мм}^2; \quad j_{bc} = \frac{I_{bc}}{q_{bc}} \dots \text{а/мм}^2;$$

$$j_{cn} = \frac{I_{cn}}{q_{cn}} \dots \text{а/мм}^2; \quad j_{nd} = \frac{I_{nd}}{q_{nd}} \dots \text{а/мм}^2.$$

9. Выбор изоляции проводов обмотки

Выбор изоляции проводов обмотки автотрансформатора производится так же, как и в маломощных трансформаторах, по позиции 7 главы первой.

10. Определение высоты и ширины окна сердечника, укладка обмотки на стержнях его и уточнение размеров окна сердечника автотрансформатора

Определение размеров окна сердечника автотрансформатора и укладка обмотки на стержнях его производится так же, как и в маломощных трансформаторах, по позициям 8 и 9 главы первой.

11. Вес меди обмотки автотрансформатора

Вес меди обмотки автотрансформатора определяется для каждого участка ее раздельно по следующим формулам:

а) для однофазного автотрансформатора (рис. 21)

$$G_{\text{мab}} = 8,9 W_{\text{ab}} q_{\text{ab}} l_{\text{wab}} \cdot 10^{-5} \text{ [кг]};$$

$$G_{\text{mbc}} = 8,9 W_{\text{bc}} q_{\text{bc}} l_{\text{wbc}} \cdot 10^{-5} \text{ [кг]};$$

$$G_{\text{mcn}} = 8,9 W_{\text{cn}} q_{\text{cn}} l_{\text{wcn}} \cdot 10^{-5} \text{ [кг]};$$

.....

$$G_{\text{мnd}} = 8,9 W_{\text{nd}} q_{\text{nd}} l_{\text{wnd}} \cdot 10^{-5} \text{ [кг]};$$

б) для трехфазного автотрансформатора

$$G_{\text{мab}} = 3 \cdot 8,9 W_{\text{ab}} q_{\text{ab}} l_{\text{wab}} \cdot 10^{-5} \text{ [кг]};$$

$$G_{\text{mbc}} = 3 \cdot 8,9 W_{\text{bc}} q_{\text{bc}} l_{\text{wbc}} \cdot 10^{-5} \text{ [кг]};$$

$$G_{\text{mcn}} = 3 \cdot 8,9 W_{\text{cn}} q_{\text{cn}} l_{\text{wcn}} \cdot 10^{-5} \text{ [кг]};$$

$$G_{\text{мnd}} = 3 \cdot 8,9 W_{\text{nd}} q_{\text{nd}} l_{\text{wnd}} \cdot 10^{-5} \text{ [кг]}.$$

Полный вес меди обмотки

$$G_{\text{м}} = G_{\text{мab}} + G_{\text{mbc}} + G_{\text{mcn}} + \dots + G_{\text{мnd}} \text{ [кг]},$$

где $W_{\text{ab}}, W_{\text{bc}}, W_{\text{cn}}, \dots$ берутся из позиции 7, $q_{\text{ab}}, q_{\text{bc}}, q_{\text{cn}}, \dots$ из позиции 8, $l_{\text{wab}}, l_{\text{wbc}}, l_{\text{wcn}}, \dots$ вычисляются по формулам позиции 10 главы первой.

12. Потери в меди обмотки автотрансформатора

Потери в меди обмотки автотрансформатора при нагрузке и 75° С определяются раздельно для каждого участка обмотки при разных коэффициентах трансформации:

а) при $k_a = \frac{U_1}{U_a}$:

$$P_{\text{мab}} = 2,4 j_{\text{ab}}^2 G_{\text{мab}} \text{ [вт]};$$

$$P_{\text{mbc}} = 2,4 j_{\text{bc}}^2 G_{\text{mbc}} \text{ [вт]};$$

$$P_{\text{mcn}} = 2,4 j_{\text{cn}}^2 G_{\text{mcn}} \text{ [вт]};$$

.....

$$P_{\text{мnd}} = 2,4 j_{\text{nd}}^2 G_{\text{мnd}} \text{ [вт]};$$

суммарные потери в меди

$$P_{\text{м}} = P_{\text{мab}} + P_{\text{mbc}} + P_{\text{mcn}} + \dots + P_{\text{мnd}} \text{ [вт]};$$

б) при $k_c = \frac{U_1}{U_c}$:

$$P_{\text{маб}} = 2,4j_{\text{аб}}^2 G_{\text{маб}} [\text{вт}];$$

$$P_{\text{мбс}} = 2,4j_{\text{бс}}^2 G_{\text{мбс}} [\text{вт}];$$

$$P_{\text{мсн}} = 2,4j_{\text{сн}}^2 G_{\text{мсн}} [\text{вт}];$$

$$\dots$$

$$P_{\text{мнд}} = 2,4j_{\text{нд}}^2 G_{\text{мнд}} [\text{вт}];$$

суммарные потери в меди

$$P_{\text{м}} = P_{\text{маб}} + P_{\text{мбс}} + P_{\text{мсн}} + \dots + P_{\text{мнд}} [\text{вт}];$$

$$\dots$$

в) при $k_n = \frac{U_1}{U_n}$:

$$P_{\text{маб}} = 2,4j_{\text{аб}}^2 G_{\text{маб}} [\text{вт}];$$

$$P_{\text{мбс}} = 2,4j_{\text{бс}}^2 G_{\text{мбс}} [\text{вт}];$$

$$P_{\text{мсн}} = 2,4j_{\text{сн}}^2 G_{\text{мсн}} [\text{вт}];$$

$$\dots$$

$$P_{\text{мнд}} = 2,4j_{\text{нд}}^2 G_{\text{мнд}} [\text{вт}];$$

суммарные потери в меди

$$P_{\text{м}} = P_{\text{маб}} + P_{\text{мбс}} + P_{\text{мсн}} + \dots + P_{\text{мнд}} [\text{вт}].$$

13. Вес стали и потери в сердечнике автотрансформатора

Определение веса стали и потерь в сердечнике автотрансформатора производится так же, как и для маломощного трансформатора, по позициям 12 и 13 главы первой.

14. Определение тока холостого хода автотрансформатора

Определение тока холостого хода автотрансформатора производится так же, как и маломощного трансформатора, по позиции 14 главы первой.

15. Коэффициент полезного действия автотрансформатора

Величина к. п. д. автотрансформатора зависит для каждой данной нагрузки от коэффициента трансформации, поэтому ее вычисляют для всех значений коэффициентов трансформации. Для удобства эти вычисления сводят в табл. 5.

Таблица 5

k	P_{mab}	P_{mbc}	P_{mcn}	P_{mnd}	P_m	P_c	P	η	Примечание
U_1/U_a									
U_1/U_c									
...	...	...	...	...	...	...	...	...	
U_1/U_n									

Величина к. п. д. определяется по формуле

$$\eta = \frac{P}{P + P_m + P_c} \cdot 100,$$

где

P —нагрузка для данного значения коэффициента трансформации по заданию, *вт*:

$$P = P_2 \cos \varphi_2, P_3 \cos \varphi_3, \dots$$

P_m —суммарные потери в меди обмотки автотрансформатора при данном коэффициенте трансформации из позиции 12 главы второй;

P_c —потери в стали сердечника автотрансформатора из позиции 13.

16. Изменение напряжения автотрансформатора при нагрузке

Величина относительного изменения напряжения в автотрансформаторе при нагрузке определяется активным и индуктивными сопротивлениями соответствующих участков обмотки автотрансформатора. Так как относительная величина индуктивной составляющей падения напряжения в маломощных автотрансформаторах значительно меньше, чем в аналогичных трансформаторах, то при определении относительного изменения напряжения в автотрансформаторе при нагрузке этой составляющей практически можно пренебречь. Поэтому для искомой величины падения напряжения в этом случае можно написать:

$$\Delta U\% = e_a\% \cdot \cos \varphi_1,$$

где

e_a —относительное активное падение напряжения в обмотке автотрансформатора при данной нагрузке вторичной цепи:

$$e_a\% = \frac{P_m}{P_2} \cdot 100;$$

P_m —суммарные потери в меди обмотки автотрансформатора из позиции 15;

P_2 —полезная нагрузка по заданию, *ва*;

$\cos \varphi_1$ —коэффициент мощности первичной цепи из позиции 2 главы второй.

В секционированном автотрансформаторе относительное изменение напряжения при нагрузке следует определить для всех коэффициентов трансформации и результаты расчета свести в табл. 6.

Таблица 6

k	P_m	$e_a \%$	$\cos \varphi_1$	$\Delta U \%$	Примечание
U_1/U_a					
U_1/U_c					
...	...	...	...	...	
U_1/U_n					

17. Проверка автотрансформатора на нагревание

Проверка автотрансформатора на нагревание производится так же, как и маломощного трансформатора по позиции 20 главы первой.

III. ПРИМЕР РАСЧЕТА МАЛОМОЩНОГО ОДНОФАЗНОГО АВТОТРАНСФОРМАТОРА С СЕКЦИОНИРОВАННОЙ ОБМОТКОЙ

Задание

Число фаз $m=1$.

Номинальная мощность вторичной цепи $P_2=150$ в $\cdot$ а.

Номинальные напряжения: $U_1=127$ в, $U_a=140$ в и $U_c=115$ в.

Частота сети $f=50$ гц.

Коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_2=1,0$.

Особые условия: автотрансформатор минимального веса для продолжительной нагрузки, исполнение—открытое, охлаждение—воздушное.

Выбор типа и основных соотношений автотрансформатора

В соответствии с условиями задания наиболее подходящим по конструкции является броневого типа автотрансформатора с сердечником из штампованных Ш-образных пластин. Отношение веса стали к весу меди примем $\alpha = \frac{G_c}{G_m} \approx 3,5$. В качестве материала сердечника можно принять электротехническую сталь марки Э41 с толщиной листа $\delta_c=0,5$ мм (ГОСТ 802=54).

1. Расчетная мощность автотрансформатора:

а) при коэффициенте трансформации $k_a \approx \frac{U_1}{U_a} = \frac{127}{140} = 0,907$

$$P_{2f} = P_2 (1 - k_a) = 150 (1 - 0,907) \approx 13,6 \text{ в}\cdot\text{а};$$

б) при коэффициенте трансформации $k_c \approx \frac{U_1}{U_c} = \frac{127}{115} = 1,1$

$$P_{2t} = P_2 \frac{k_c - 1}{k_c} = 150 \cdot \frac{1,1 - 1}{1,1} \approx 14 \text{ в а.}$$

Таблица 1'

k	P_2	P_{2t}
$\frac{U_1}{U_a} = 0,907$	150	13,6
$\frac{U_1}{U_c} = 1,1$	150	14

2. Определение токов автотрансформатора:

а) при $k_a \approx \frac{U_1}{U_a} = 0,907$

$$I_1 = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{U_1 \eta \cos \varphi_1} = \frac{150 \cdot 1}{127 \cdot 0,96 \cdot 1} \approx 1,23 \text{ а; } I_{1a} \approx I_1 = 1,23 \text{ а;}$$

$$I_{1p} \approx I_\mu = 0,05 \text{ а;}$$

$$I_2 = \frac{P_2}{U_a} = \frac{150}{140} = 1,07 \text{ а; } I_{2a} = I_2 = 1,07 \text{ а; } I_{2p} = 0,$$

где принято:

$$I_\mu \% \approx (40 \div 50) \frac{P_{2t}}{P_2} \approx 40 \cdot \frac{14}{150} \approx 4\% \text{ от } I_{1a};$$

$$I_\mu = \frac{I_\mu \% \cdot I_{1a}}{100} = \frac{4 \cdot 1,23}{100} = 0,05 \text{ а;}$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_\mu}{I_{1a}}\right)^2}} \approx 1,0; \quad \eta = \frac{P_2}{P_2 + \left(\frac{1 - \eta_{2t}}{\eta_{2t}}\right) P_{2t}} =$$

$$= \frac{150}{150 + \frac{1 - 0,7}{0,7} \cdot 14} \approx 0,96;$$

при этом по кривой рис. 15 $\eta_{2t} = 0,7$ при $P_{2t} = 14 \text{ в а;}$

б) при $k_c = \frac{U_1}{U_c} = 1,1$

$$I_1 = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{U_1 \eta \cos \varphi_1} = \frac{150 \cdot 1}{127 \cdot 0,96 \cdot 1} = 1,23 \text{ а; } I_{1a} \approx I_1 = 1,23 \text{ а;}$$

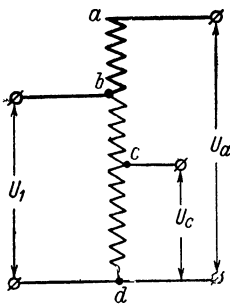
$$I_{1p} = 0,05 \text{ а;}$$

$$I_2 = \frac{P_2}{U_c} = \frac{150}{115} = 1,3 \text{ а; } I_{2a} = I_2 = 1,3 \text{ а; } I_{2p} = 0.$$

Таблица 2'

k	P_2	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	I_2	I_{2a}	I_1	I_{1a}	I_{1p}	$\cos \varphi_1$	η	Примечание
$\frac{U_1}{U_a} = 0,907$	150	1	0	1,07	1,07	1,23	1,23	0,05	1	0,96	
$\frac{U_1}{U_c} = 1,1$	150	1	0	1,3	1,3	1,23	1,23	0,05	1	0,96	

3. Токи отдельных частей обмотки автотрансформатора (рис. 22):



а) при $k_a = \frac{U_1}{U_a} \approx 0,907$

$$I_{ab} = I_2 = 1,07 \text{ а};$$

$$I_{bd} = I_1 - I_2 = \sqrt{(I_{1a} - I_{2a})^2 + (I_{1p} - I_{2p})^2} = \sqrt{(1,23 - 1,07)^2 + (0,05 - 0)^2} = 0,175 \text{ а};$$

б) при $k_c \approx \frac{U_1}{U_c} = 1,1$

$$I_{ab} = 0; \quad I_{bc} = I_1 = 1,23 \text{ а};$$

$$I_{cd} = I_2 - I_1 = \sqrt{(I_{2a} - I_{1a})^2 + (I_{2p} - I_{1p})^2} = \sqrt{(1,3 - 1,23)^2 + (0 - 0,05)^2} = 0,101 \text{ а}.$$

Рис. 22. Схема проектируемого автотрансформатора

Таблица 3'

k	I_{ab}	I_{bc}	I_{cd}
$\frac{U_1}{U_a} = 0,907$	1,07	0,175	0,175
$\frac{U_1}{U_c} = 1,1$	0	1,23	0,101

4. Предварительное значение индукции в стержне:

$$B_c = 13\,000 \text{ гс}.$$

5. Предварительное значение плотности тока в обмотке автотрансформатора

$$j = 4,0 \text{ а/мм}^2.$$

6. Поперечное сечение стержня сердечника автотрансформатора:

$$S_c = C \sqrt{\frac{P_{2f\alpha} \cdot 10^3}{f B_{\Sigma} j}} = 0,8 \sqrt{\frac{14 \cdot 3,5 \cdot 10^6}{50 \cdot 13000 \cdot 4,0}} \approx 3,6 \text{ см}^2;$$

полное сечение стержня

$$S'_c = \frac{S_c}{k_3} = \frac{3,6}{0,92} = 3,9 \text{ см}^2.$$

7. Число витков обмотки автотрансформатора:

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot 10^8}{4,44 f B_c S_c} = \frac{127 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 13000 \cdot 3,6} = 1225;$$

$$e_w = \frac{U_1}{W_1} = \frac{127}{1225} = 0,1038 \text{ в/виток};$$

$$W_{ab} = \frac{U_a - U_b}{e_w} = \frac{140 - 127}{0,1038} = 125;$$

$$W_{bc} = \frac{U_b - U_c}{e_w} = \frac{127 - 115}{0,1038} = 115;$$

$$W_{cd} = \frac{U_c}{e_w} = \frac{115}{0,1038} = 1110.$$

8. Сечения и диаметры проводов обмотки. Предварительные значения поперечных сечений отдельных участков обмотки (рис. 22):

$$q_{ab} = \frac{I_{ab}}{I'_{ab}} = \frac{1,07}{4} = 0,268 \text{ мм}^2; \quad q'_{bc} = \frac{I_{bc}}{I'_{bc}} = \frac{1,23}{4} = 0,304 \text{ мм}^2;$$

$$q'_{cd} = \frac{I_{cd}}{I'_{cd}} = \frac{0,175}{4} = 0,0437 \text{ мм}^2.$$

Окончательные значения поперечных сечений и диаметров проводов по данным ГОСТ 2773-51 из приложения I:

$$q_{ab} = 0,273 \text{ мм}^2; \quad \frac{d_{ab}}{d_{abu}} = \frac{0,59}{0,64} \text{ мм};$$

$$q_{bc} = 0,301 \text{ мм}^2; \quad \frac{d_{bc}}{d_{bcu}} = \frac{0,62}{0,67} \text{ мм};$$

$$q_{cd} = 0,0440 \text{ мм}^2; \quad \frac{d_{cd}}{d_{cdn}} = \frac{0,25}{0,275} \text{ мм}.$$

Марка провода—ПЭЛ.

Окончательные плотности тока в проводах:

а) при $k_a \approx \frac{U_1}{U_a} = 0,907$

$$j_{ab} = \frac{I_{ab}}{q_{ab}} = \frac{1,07}{0,273} = 3,91 \text{ а/мм}^2; \quad j_{bc} = \frac{I_{bc}}{q_{bc}} = \frac{0,175}{0,301} = 0,58 \text{ а/мм}^2$$

$$j_{cd} = \frac{I_{cd}}{q_{cd}} = \frac{0,175}{0,0440} = 3,97 \text{ а/мм}^2;$$

б) при $k_c \approx \frac{U_1}{U_c} = 1,1$

$$j_{ab} = 0; \quad j_{bc} = \frac{I_{bc}}{q_{bc}} = \frac{1,23}{0,301} = 4,08 \text{ а/мм}^2;$$

$$j_{cd} = \frac{I_{cd}}{q_{cd}} = \frac{0,101}{0,0440} = 2,3 \text{ а/мм}^2.$$

Таблица 4'

k	$\frac{U_1}{U_a} \approx 0,907$	$\frac{U_1}{U_c} \approx 1,1$
$\frac{I_{ab}}{j_{ab}}$	$\frac{1,07}{3,91}$	$\frac{0}{0}$
$\frac{I_{bc}}{j_{bc}}$	$\frac{0,175}{0,58}$	$\frac{1,23}{4,08}$
$\frac{I_{cd}}{j_{cd}}$	$\frac{0,175}{3,97}$	$\frac{0,101}{2,3}$

9. Высота окна сердечника автотрансформатора:

$$H = \sqrt{\frac{k q_{ab} W_{ab} + q_{bc} W_{bc} + d_{cd} W_{cd}}{100k_0}} =$$

$$= \sqrt{2,8 \cdot \frac{0,273 \cdot 125 + 0,301 \cdot 115 + 0,0440 \cdot 1110}{100 \cdot 0,3}} \approx 3,4 \text{ см.}$$

Ближайшая высота и ширина окна Ш-образных пластин „безотходной“ штамповки с уширенным ярмом согласно приложению III:

$$H = 3,35 \text{ см}; \quad a_c = 1,9 \text{ см}; \quad h_{я} = 1,2 \text{ см}; \quad b = 1,2 \text{ см};$$

$$b_c = \frac{S'_c}{a_c} = \frac{3,9}{1,9} \approx 2,0 \text{ см};$$

$$S_{я} = 0,92 b_c h_{я} = 0,92 \cdot 2 \cdot 1,2 = 2,2 \text{ см}^2.$$

Проверка ширины окна сердечника:
число витков в слое части обмотки ab

$$n_3 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{abн}} = \frac{33,5 - 2 \cdot 2}{0,64} \approx 46;$$

число слоев этой части обмотки

$$m_3 = \frac{W_{ab}}{n_3} = \frac{125}{46} = 2,72 \approx 3;$$

толщина части обмотки ab :

$$\delta_3 = m_3 d_{abн} = 3 \cdot 0,64 \approx 1,9 \text{ мм};$$

число витков в слое части обмотки bc

$$n_2 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{bcн}} = \frac{33,5 - 2 \cdot 2}{0,67} \approx 44;$$

число слоев этой части обмотки

$$m_2 = \frac{W_{bc}}{n_2} = \frac{115}{44} = 2,7 \approx 3;$$

толщина части обмотки bc

$$\delta_2 = m_2 d_{bcн} = 3 \cdot 0,67 \approx 2 \text{ мм};$$

число витков в слое части обмотки cd

$$n_1 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{cdн}} = \frac{33,5 - 2 \cdot 2}{0,275} = 107;$$

число слоев этой части обмотки

$$m_1 = \frac{W_{cd}}{n_1} = \frac{1110}{107} = 11;$$

толщина части обмотки cd

$$\delta_1 = m_1 d_{cdн} = 11 \cdot 0,275 \approx 3 \text{ мм};$$

ширина окна сердечника

$$b = k_2 (\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3) + \varepsilon_3 = \\ = 1,2 (1 + 3 + 0 + 2 + 0 + 1,9) + 2 = 11,6 \approx 12 \text{ мм},$$

где принято:

$\varepsilon_1 = 2 \text{ мм}$; $\varepsilon_0 = 1,0 \text{ мм}$ — электрокартон ЭВ (ГОСТ 2824-45);

$\delta_{12} = \delta_{23} = 0$; $\varepsilon_3 = 2 \text{ мм}$; $k_2 = 1,2$.

Отношение

$$k = \frac{H}{b} = \frac{33,5}{12} = 2,8.$$

10. *Вес меди обмоток автотрансформатора.* Обмотка из тонкой проволоки наматывается на стержень первой

$$G_{мcd} = 8,9 W_{cd} q_{cd} l_{wcd} \cdot 10^{-5} = 8,9 \cdot 1110 \cdot 0,044 \cdot 10,0 \cdot 10^{-5} = 0,043 \text{ кг};$$

$$l_{wcd} = 2(a_c + b_c + 4\varepsilon_0 + 2\delta_1) = 2(1,9 + 2 + 4 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,3) \approx 10,0 \text{ см};$$

$$G_{мbc} = 8,9 W_{bc} q_{bc} l_{wbc} \cdot 10^{-5} = 8,9 \cdot 115 \cdot 0,301 \cdot 12,0 \cdot 10^{-5} \approx 0,036 \text{ кг};$$

$$l_{wbc} = 2[a_c + b_c + 4(\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12}) + 2\delta_2] = 2[1,9 + 2 + 4(0,1 + 0,3) + 2 \cdot 0,2] \approx 12,0 \text{ см};$$

$$G_{мab} = 8,9 W_{ab} q_{ab} l_{wab} \cdot 10^{-5} = 8,9 \cdot 125 \cdot 0,273 \cdot 15,6 \cdot 10^{-5} = 0,047 \text{ кг};$$

$$l_{wab} = 2[a_c + b_c + 4(\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23}) + 2\delta_3] = 2[1,9 + 2 + 4(0,1 + 0,3 + 0,2) + 2 \cdot 0,19] = 15,6 \text{ см}.$$

Полный вес меди обмотки:

$$G_{м} = G_{мcd} + G_{мbc} + G_{мab} = 0,043 + 0,036 + 0,047 = 0,126 \text{ кг}.$$

11. *Потери в меди обмотки автотрансформатора при 75° С:*

а) при $k_a \approx \frac{U_1}{U_a} = 0,907$

$$P_{маb} = 2,4 j_{ab}^2 G_{маb} = 2,4 \cdot 3,91^2 \cdot 0,047 = 1,72 \text{ Вт};$$

$$P_{мbc} = 2,4 j_{bc}^2 G_{мbc} = 2,4 \cdot 0,58^2 \cdot 0,036 = 0,29 \text{ Вт};$$

$$P_{мcd} = 2,4 j_{cd}^2 G_{мcd} = 2,4 \cdot 3,97^2 \cdot 0,043 = 1,61 \text{ Вт};$$

суммарные потери в меди обмотки

$$P_{м} = P_{маb} + P_{мbc} + P_{мcd} = 1,72 + 0,29 + 1,61 = 3,62 \text{ Вт};$$

б) при $k_c \approx \frac{U_1}{U_c} = 1,1$

$$P_{маb} = 2,4 j_{ab}^2 G_{маb} = 0, \text{ так как } j_{ab} = 0;$$

$$P_{мbc} = 2,4 j_{bc}^2 G_{мbc} = 2,4 \cdot 4,08^2 \cdot 0,036 = 1,45 \text{ Вт};$$

$$P_{мcd} = 2,4 j_{cd}^2 G_{мcd} = 2,4 \cdot 2,3^2 \cdot 0,043 = 0,54 \text{ Вт};$$

суммарные потери в меди обмотки

$$P'_{м} = P_{маb} + P_{мbc} + P_{мcd} = 0 + 1,45 + 0,54 = 1,99 \text{ Вт}.$$

12. *Вес стали сердечника автотрансформатора и потери в нем:*

вес стержня сердечника

$$G_{cc} = 7,8 H S_c \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot 3,35 \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} \approx 0,095 \text{ кг};$$

вес ярем сердечника

$$G_{\text{ср}} = 2,7,8 (H + l_{\text{я}}) S_{\text{я}} \cdot 10^{-3} = 2,7,8 (3,35 + 6,7) \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} \approx 0,344 \text{ кг};$$

$$l_{\text{я}} = a_{\text{с}} + 2b + 2h_{\text{я}} = 1,9 + 2 \cdot 1,2 + 2 \cdot 1,2 = 6,7 \text{ см};$$

полный вес стали сердечника

$$G_{\text{с}} = G_{\text{сс}} + G_{\text{ср}} = 0,095 + 0,344 \approx 0,44 \text{ кг}.$$

потери в стали сердечника

$$P_{\text{сс}} = k_{\text{с}} \left(\frac{B_{\text{с}}}{10\,000} \right)^2 G_{\text{сс}} = 1,6 \left(\frac{13\,000}{10\,000} \right)^2 0,095 = 0,257 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{ср}} = k_{\text{с}} \left(\frac{B_{\text{я}}}{10\,000} \right)^2 G_{\text{ср}} = 1,6 \left(\frac{10\,650}{10\,000} \right)^2 0,344 = 0,620 \text{ Вт};$$

$$B_{\text{я}} = B_{\text{с}} \frac{S_{\text{с}}}{2S_{\text{я}}} = 13\,000 \cdot \frac{3,6}{2 \cdot 2,2} = 10\,650 \text{ Гс};$$

полные потери в стали сердечника

$$P_{\text{с}} = P_{\text{сс}} + P_{\text{ср}} = 0,257 + 0,620 \approx 0,88 \text{ Вт}.$$

13. Ток холостого хода автотрансформатора:

$$\begin{aligned} I_0 &\approx I_{\mu} = \frac{aw_{\text{с}} l'_{\text{с}} + aw_{\text{я}} l'_{\text{я}} + 0,8 B_{\text{с}} n \delta_{\text{я}}}{\sqrt{2} W_1} = \\ &= \frac{6,8 \cdot 3,35 + 2,2 \cdot 10,0 + 0,8 \cdot 13\,000 \cdot 2 \cdot 0,004}{\sqrt{2} \cdot 1225} \approx 0,075 \text{ А}, \end{aligned}$$

где

$$\left. \begin{aligned} l'_{\text{с}} &= H = 3,35 \text{ см}; \quad aw_{\text{с}} = 6,8 \\ aw_{\text{я}} &= 2,2 \end{aligned} \right\} \text{ по кривой рис. 41 для стали марки Э41};$$

$$l'_{\text{я}} = H + l_{\text{я}} = 3,35 + 6,7 \approx 10,0 \text{ см};$$

$$I_{\mu} \% = \frac{I_{\mu}}{I_1} \cdot 100 = \frac{0,075}{1,23} \cdot 100 \approx 6\%.$$

14. Коэффициент полезного действия автотрансформатора:

$$\text{а) при } k_{\text{а}} \approx \frac{U_1}{U_{\text{а}}} = 0,907$$

$$\eta = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{P_2 \cos \varphi_2 + P_{\text{с}} + P_{\text{м}}} \cdot 100 = \frac{150 \cdot 1}{150 \cdot 1 + 0,88 + 3,62} \cdot 100 = 97,0\%;$$

$$\text{б) при } k_{\text{с}} \approx \frac{U_1}{U_{\text{с}}} = 1,1$$

$$\eta = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{P_2 \cos \varphi_2 + P_{\text{с}} + P'_{\text{м}}} \cdot 100 = \frac{150 \cdot 1}{150 \cdot 1 + 0,88 + 1,99} \cdot 100 = 98,0\%.$$

15. Изменение напряжения при нагрузке:

а) при $k_a \approx \frac{U_1}{U_a} = 0,907$

$$e_a \% = \frac{P_m}{P_2} \cdot 100 = \frac{3,62}{150} \cdot 100 \approx 2,4 \%;$$

$$\Delta U \% \approx e_a \% \cdot \cos \varphi_1 \approx 2,4 \%;$$

б) при $k_c \approx \frac{U_1}{U_c} = 1,1$

$$e'_a \% = \frac{P'_m}{P_2} \cdot 100 = \frac{1,99}{150} \cdot 100 \approx 1,3 \%;$$

$$\Delta U' \% \approx e'_a \% \cdot \cos \varphi_1 \approx 1,3 \%$$

16. Проверка автотрансформатора на нагревание:

$$\theta = \frac{P_c + P_m}{13 \cdot 10^{-4} (S_{сер} + S_{обм})} + \Delta \theta^\circ = \frac{0,88 + 3,62}{13 \cdot 10^{-4} (110 + 47)} + 15^\circ \approx 37^\circ \text{ C},$$

где

$$S_{сер} \approx 2(b_c + 2h_{я})l_{я} + 4(b_c + h_{я})H + 4b_ch_{я} = 2(2 + 2 \cdot 1,2)6,7 + 4(2 + 1,2)3,35 + 4 \cdot 2 \cdot 1,2 = 110 \text{ см}^2;$$

$$S_{обм} \approx 2[a_c + b_c + 4(\epsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3)]H = 2[1,9 + 2 + 4(0,1 + 0,3 + 0 + 0,2 + 0 + 0,19)]3,35 = 47 \text{ см}^2.$$

ПИКОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Под пиковым трансформатором понимается специальный тип трансформатора, который служит для преобразования первичного напряжения синусоидальной формы во вторичное напряжение с крутым фронтом волны в виде пика. Эти трансформаторы получили практическое применение в установках с тиратронами и ртутными выпрямителями, снабженными регулирующими сетками, и являясь в них одним из необходимых элементов. Они также встречаются в индикаторных схемах некоторых радиоустройств для преобразования синусоидальных колебаний напряжения в импульсные.

Принцип получения пиковой формы кривой напряжения в трансформаторе основывается на уплощении кривой потока в сердечнике его во

времени. Известно, что при последовательном соединении первичной обмотки трансформатора с индуктивностью неизменной величины и при синусоидальном общем напряжении (рис. 23) кривая потока во времени в сердечнике трансформатора уплощается, а кривые первичного и вторичного напряжений, как производные от потока по времени, заостряются. Этот принцип и лежит в основе работы пиковых трансформаторов. В самом деле, если приложенное к первичной цепи пикового трансформатора (рис. 23) напряжение имеет вид

$$u_1 = U_1 \sqrt{2} \sin \omega t,$$

то уравнение равновесия напряжений в этой цепи будет:

$$U_1 \sqrt{2} \sin \omega t = W_1 \frac{d\varphi}{dt} \cdot 10^{-8} + i_1 r_1 + L \frac{di_1}{dt}, \quad (1)$$

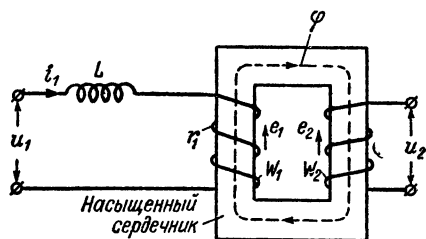


Рис 23. Пиковый трансформатор стержневого типа с индуктивностью в первичной цепи

где L — суммарная индуктивность внешней катушки и рассеяния первичной обмотки трансформатора.

После интегрирования уравнения (1) при условии пренебрежения активным сопротивлением первичной цепи трансформатора ($r_1 \approx 0$) получается следующее уравнение потокоцеплений в этой цепи в вольт-секундах:

$$\Psi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = W_1 \varphi \cdot 10^{-8} + Li_1, \quad (2)$$

где $\Psi_m = \frac{U_1 \sqrt{2}}{\omega}$ — амплитуда суммарного значения потокоцеплений в первичной цепи в вольтсекундах.

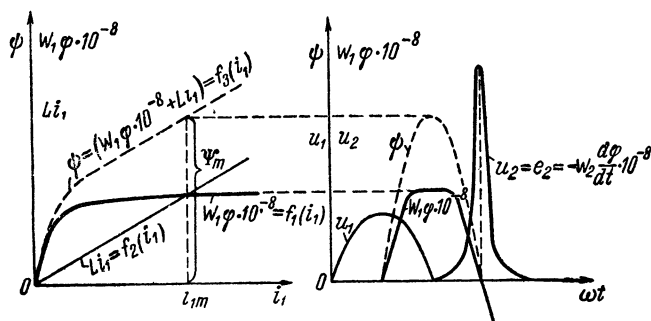


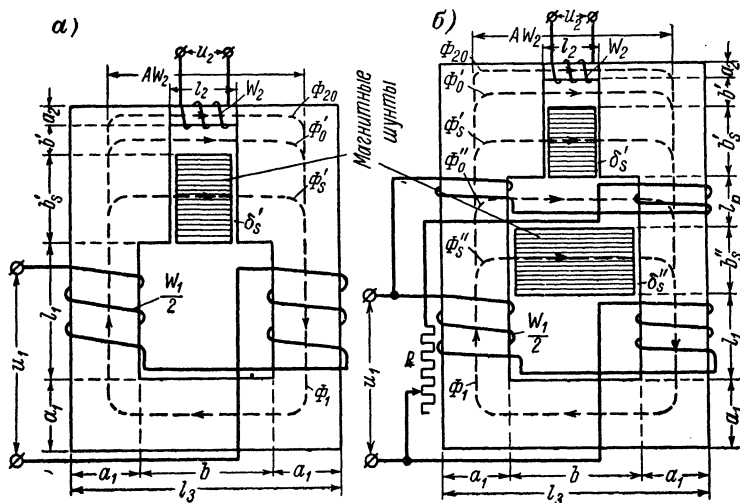
Рис. 24. Принцип получения напряжения пиковой формы

На рис. 24 представлены кривые намагничивания отдельных элементов трансформатора: сердечника $W_1 \varphi \cdot 10^{-8} = f_1(i_1)$, индуктивной катушки $Li_1 = f_2(i_1)$ и суммарная кривая $\psi = f_3(i_1)$ и зависимости потокоцеплений во времени. Кривая потокоцеплений сердечника трансформатора уплощается во времени, а кривая вторичного напряжения, как производная от этого потока по времени, заостряется. Чем больше величина постоянной индуктивности в первичной цепи трансформатора, тем более уплощается кривая потока во времени в сердечнике и заостряется кривая э. д. с. Этот принцип, как указывалось, и лежит в основе работы пиковых трансформаторов. Эти трансформаторы обычно выполняются однофазными.

По конструкции сердечника однофазные пиковые трансформаторы могут быть следующих типов:

- 1) трансформаторы стержневого типа:
 - а) с последовательно включенной в первичную цепь индуктивной катушкой без стального сердечника (рис. 23);
 - б) с магнитными шунтами (рис. 25, а и б);
- 2) трансформаторы броневого типа с магнитными шунтами (рис. 26, а и б).

Пиковые трансформаторы с магнитными шунтами имеют некоторые преимущества перед стержневым трансформатором с отдельной индуктивной катушкой в первичной цепи, так



как в них может отсутствовать такая катушка и требуется значительно меньше специального сплава для сердечника.

На рис. 25 и 26 представлены пиковые трансформаторы стержневого и броневые типов с магнитными шунтами. Главные стержни, ярма и магнитные шунты этих трансформаторов изготавливаются из обыкновенной листовой электротехнической стали марок Э41 и Э42 (старые марки Э4, Э4А и Э4АА) толщиной листа 0,35 мм (ГОСТ 802-54), а стержни, на которых расположены вторичные обмотки, целесообразно изготавливать из специального сплава, как, например, пермаллой и др. Они могут изготавливаться также и из обыкновенной электротехнической стали, как и другие части сердечника пикового трансформатора.

69

водится впереплет. В окна сердечника трансформатора между первичной и вторичной обмотками помещаются магнитные шунты, которые представляют собой пакеты полосок из листовой электротехнической стали (рис. 25 и 26).

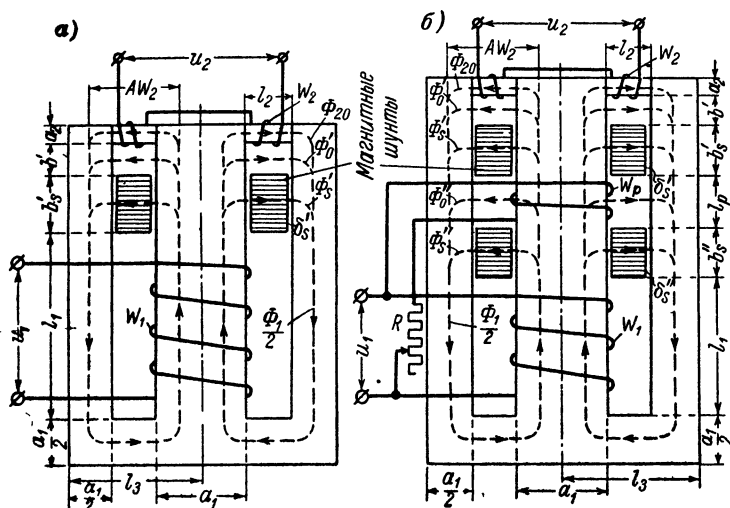


Рис. 26. Пиковые трансформаторы броневого типа: а — без регулирования; б — с регулированием выпрямленного тока

На рис. 27 представлены кривые первичного и вторичного потоков и напряжений при холостом ходе пикового трансформатора.

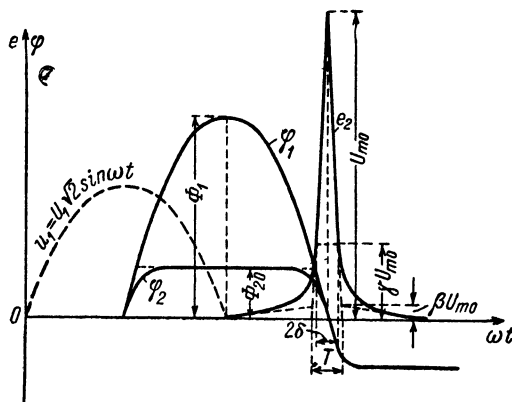


Рис. 27. Кривые потоков и вторичной э. д. с. во времени пикового трансформатора

матора. Когда вторичные стержни насыщаются, первичный поток в основном проходит через магнитные шунты и торцы окна сердечника, а кривая вторичного потока во времени уплощается. При быстром изменении вторичного потока от поло-

жительного значения, к отрицательному, или наоборот, во вторичной обмотке индуцируется э. д. с. пиковой формы во времени. Ее максимум совпадает с моментом прохождения вторичного потока через нулевое значение.

Как показывает рис. 27, ширина пика кривой вторичной э. д. с. 28 на высоте γU_{m0} от основания зависит от амплитуды кривой вторичного потока Φ_{20} . Начиная с высоты γU_{m0} от основания, пик кривой э. д. с. имеет до самой вершины практически форму узкого треугольника с высотой $(1-\gamma) U_{m0}$. Величина γ зависит от материала вторичного стержня и средней скорости изменения вторичного напряжения и может быть определена по эмпирической кривой.

На рис. 28 представлены эмпирические кривые коэффициентов β и γ , указанных на рис. 27, в зависимости от средней скорости изменения вторичного напряжения ξ в случае вторичных стержней пикового трансформатора из обыкновенной электротехнической стали марок Э41 и Э42 (старые марки Э4, Э4А и Э4АА) толщиной листа 0,35 мм (ГОСТ 802-54). Эти коэффициенты можно аналитически представить следующими приближенными эмпирическими формулами:

а) для обыкновенной электротехнической стали (рис. 28)

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{1,5}{15 + \xi}, \\ \gamma &= \frac{13}{30 + \xi}; \end{aligned} \right\} \quad (3a)$$

б) для пермаллоя разных марок

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{0,7}{15 + \xi}, \\ \gamma &= \frac{6}{30 + \xi}. \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

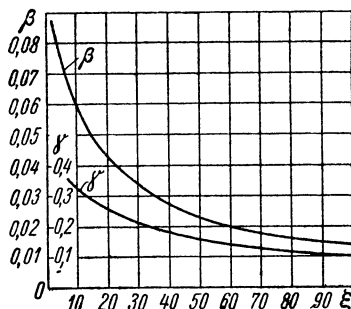


Рис. 28 Кривые коэффициентов β и γ при изготовлении вторичных стержней из обыкновенной трансформаторной стали

Средняя скорость изменения вторичного напряжения ξ определяется отношением удвоенной амплитуды напряжения U_{m0} к ширине основания треугольника T в градусах, вписанного в пиковую кривую и лежащего основанием на оси абсцисс.

Из рис. 27 при холостом ходе трансформатора следует:

$$\xi_0 = \frac{2U_{m0}}{T} = \frac{(1-\gamma) U_{m0}}{\delta} [\text{в/град}], \quad (4)$$

где δ — половина ширины пика вторичного напряжения в градусах на высоте γU_{m0} от основания, соответствующая ординате синусоидальной кривой первичного потока сердечника транс-

форматора, отсекаемой горизонтальной, прямой, проходящей через амплитудное значение вторичного потока Φ_{20} .

В связи с этим амплитуды первичного и вторичного потоков в сердечнике пикового трансформатора связаны соотношением (рис. 27):

$$\sin \delta \approx \frac{\Phi_{20}}{\Phi_1} = \frac{B_2 S_2}{B_1 S_1}, \quad (5)$$

где

B_1 и B_2 —амплитуды индукций в главном и вторичном стержнях трансформатора, *гс*;

S_1 и S_2 —поперечные сечения указанных стержней, *см*².

При этом в случае пикового трансформатора бронзового типа в уравнение (5) нужно подставить половину сечения главного стержня $\frac{S_1}{2}$ или половину амплитуды первичного потока $\frac{\Phi_1}{2}$.

При расчете пиковых трансформаторов на повышенные частоты порядка нескольких единиц или десятков килогерц вместо средней скорости изменения вторичного напряжения пикового трансформатора в *в/град*, при необходимости можно пользоваться также понятием средней крутизны этого напряжения в *в/мксек*. Если выразить ширину основания вписанного в пиковую кривую треугольника T (рис. 27) в *мксек* с помощью соотношения $t' = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{T}{\omega} \cdot 10^6$, то средняя крутизна вторичного напряжения пикового трансформатора в *в/мксек* будет:

$$\xi'_0 = \frac{2U_{m0}}{t'} = 360f \cdot 10^{-6} \xi_0 \text{ [в/мксек]}, \quad (6)$$

где ξ_0 —средняя скорость изменения вторичного напряжения трансформатора, *в/град*; f частота питающей сети, *гц*.

Уравнение (6) удобно выражает взаимную связь между средними скоростями изменения вторичного напряжения пикового трансформатора, заданными в *в/град* или *в/мксек*, и, следовательно, позволяет пользоваться приводимой здесь методикой расчета трансформатора при любой форме задания этой величины.

Для целей регулирования величины выпрямленного тока тиратронов и ртутных выпрямителей с помощью имеющихся в них сеток необходимо изменять фазу кривой импульсного напряжения, подводимого к сетке, относительно выпрямляемого напряжения. Пиковые трансформаторы с магнитными шунтами при соответствующем устройстве могут выполнять также и эту функцию.

На рис. 25,б и 26,б представлены такие трансформаторы с регулируемой фазой пиковой кривой вторичного напряжения. На главных стержнях трансформаторов помещается регулировочная обмотка, отделенная от первичной дополнительными магнитными шунтами. Эта обмотка включается через регулируемое активное сопротивление на то же напряжение, что и первичная обмотка трансформатора.

Изменение фазы пиковой кривой вторичного напряжения здесь основано на смещении по фазе вторичного потока относительно первичного путем наложения на последний дополнительного потока регулировочной обмотки, имеющего другую фазу и изменяемую величину. В этом случае через вторичный стержень будет проходить результирующий поток, представляющий собой геометрическую сумму указанных потоков. Фаза этого потока может изменяться величиной тока регулировочной обмотки посредством изменения последовательно включенного с ней активного сопротивления. При этом с изменением фазы будет также изменяться и величина результирующего потока, проходящего через вторичный стержень трансформатора.

II. РАСЧЕТ ПИКОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Исходные данные для расчета пикового трансформатора:

первичное напряжение U_1 [в];

амплитуда вторичного пикового напряжения при нагрузке

U_m [в];

действующее значение вторичного тока нагрузки I_2 [а];

средняя скорость изменения вторичного напряжения при нагрузке ξ [в/град];

частота питающей сети f [гц];

наибольший сдвиг фазы вторичного напряжения в случае регулируемого трансформатора θ_m [град].

Величины амплитуд и средних скоростей изменения вторичного напряжения, а также действующие значения вторичного тока нагрузки пиковых трансформаторов в зависимости от области применения последних обычно находятся в пределах, указанных в табл. 7.

Таблица 7

Применение пикового трансформатора	U_m в	ξ в/град	I_2 а
Для тиратронов	30—50 50—100 свыше 100	10—20 20—40 40—80	0,01—0,20
Для ртутных выпрямителей . . .	150—250 250—500	10—20 20—40	0,05—0,80

Кроме указанных данных при расчете пикового трансформатора необходимо знать также коэффициент формы кривой k_f и коэффициент амплитуды k_a вторичного напряжения при заданной амплитуде и средней скорости изменения этого напряжения. Эти коэффициенты можно определить аналитически в зависимости от вида пиковой кривой вторичного напряжения (рис. 27).

После замены действительной пиковой кривой вторичного напряжения вписанным пунктирным треугольником (рис. 27) аналитическое вычисление, с учетом закруглений кривой у основания и опытных данных, дает для этих коэффициентов следующие приближенные формулы, достаточные для практических расчетов:

$$k_f = \frac{2 \sqrt{30 U_m \xi}}{1,5 U_m + 90 \beta \xi}, \quad (7)$$

$$k_a = \sqrt{\frac{270 \xi}{U_m}}, \quad (8)$$

$$k_0 = k_a k_f' = \frac{180 \cdot \xi}{1,5 U_m + 90 \beta \xi}, \quad (9)$$

где коэффициент β определяется в зависимости от средней скорости изменения вторичного напряжения ξ по опытной кривой рис. 28 или эмпирическим формулам (3а)—в случае выполнения вторичного стержня из обыкновенной электротехнической стали, или по эмпирическим формулам (3б)—для вторичного стержня из пермаллоя разных марок.

1. Типы пиковых трансформаторов

Как указывалось, по конструкции сердечника пиковые трансформаторы с магнитными шунтами могут быть стержневого и броневого типов (рис. 25 и 26). Пиковые трансформаторы стержневого типа имеют определенные преимущества перед трансформаторами броневого типа в отношении простоты конструкции в целом, меньшего расхода меди для обмоток и лучших условий охлаждения. В связи с этим при выборе типа пикового трансформатора предпочтительнее останавливаться на стержневом типе.

Материалом для главных стержней, ярем и магнитных шунтов этих трансформаторов, как указывалось, является обыкновенная листовая электротехническая сталь марок Э41 и Э42 (старые марки Э4, Э4А и Э4АА) толщиной листа 0,35 мм; для вторичных стержней целесообразно применять специальные магнитные сплавы, как, например, пермаллой и др.

2. Определение поперечного сечения вторичного стержня трансформатора

Поперечное сечение вторичного стержня пикового трансформатора определяется по следующей формуле, представляющей собой видоизменение известной формулы для нормального силового трансформатора:

а) для трансформатора стержневого типа (рис. 25)

$$S_2 = 5,4 \sqrt{\frac{U_m I_2 \alpha \cdot 10^4}{k_0 f I_2 B_2}} \text{ [см}^2\text{]};$$

б) для трансформатора бронзового типа (рис. 26)

$$S_2 = 3,8 \sqrt{\frac{U_m I_2 \alpha \cdot 10^4}{k_0 f I_2 B_2}} \text{ [см}^2\text{]},$$

где

U_m и I_2 —амплитуда вторичного напряжения и действующее значение тока нагрузки по заданию;

f —частота питающей сети, гц;

$k_0 = k_a k_f$ —по уравнению (9);

$j_2 = 1,8 \div 2,6 \text{ а/мм}^2$ —плотность тока в проводнике вторичной обмотки;

B_2 —амплитуда индукции насыщения во вторичном стержне, которая находится в следующих пределах:

а) для обыкновенной электротехнической стали марок Э41, и Э42 (старые марки Э4, Э4А и Э4АА) (см. рис. 41):

$$B_2 = 18\,000 \div 20\,000 \text{ гс};$$

б) для пермаллоя разных марок (см. рис. 42):

$$B_2 = 8000 \div 11\,000 \text{ гс};$$

$$\alpha = \frac{G_{с2} l_{w2}}{G_{м2} l_2} = 2,4 \div 5,2,$$

здесь

$G_{с2}$ —вес стали вторичного стержня;

$G_{м2}$ —вес меди обмотки этого стержня;

l_{w2} —средняя длина витка вторичной катушки;

l_2 —длина вторичного стержня.

Меньшие значения α относятся к меньшим плотностям тока в проводниках вторичной обмотки и к большим амплитудам вторичного напряжения, большие значения α —к большим плотностям тока и меньшим амплитудам напряжения.

Поперечное сечение вторичного стержня пикового трансформатора выполняется прямоугольной формы с соотношением сторон $\zeta = \frac{b_2}{a_2} = 3 \div 4$ и более, тогда размеры этого сечения будут:

$$a_2 = \sqrt{\frac{S_2}{k_3 \zeta}} \text{ [см]},$$

$$b_2 = \zeta a_2 \text{ [см]},$$

где $k_3 = 0,88 \div 0,92$ — коэффициент заполнения поперечного сечения стержня сталью.

3. Определение числа витков вторичной обмотки

Число витков одной вторичной катушки пикового трансформатора определяется следующим образом:

а) для трансформатора стержневого типа (рис. 25)

$$W_2 = \frac{U_m \cdot 10^8}{4k_0 f \Phi_2};$$

б) для трансформатора броневое типа (рис. 26)

$$W_2 = \frac{U_m \cdot 10^8}{8k_0 f \Phi_2},$$

где $\Phi_2 = B_2 S_2$ — вторичный поток одного стержня при нагрузке; U_m и f берутся по заданию, B_2 и S_2 — из позиции 2, $k_0 = k_a k_f$ — по уравнению (9).

4. Определение сечения и диаметра провода вторичной обмотки и длины вторичного стержня

Предварительное значение поперечного сечения провода вторичной обмотки

$$q'_2 = \frac{I_2}{j_2} \text{ [мм}^2\text{]},$$

где I_2 берется по заданию; $j_2 = 1,8 \div 2,6 \text{ а/мм}^2$ — плотность тока в проводе вторичной обмотки.

Окончательные значения сечения и диаметра этого провода выбираются по ближайшим данным ГОСТ из приложения I:

$$q_2 = \dots \text{ мм}^2; \frac{d_2}{d_{2н}} = \dots \text{ мм}.$$

После выбора диаметра провода производится размещение обмотки на вторичном стержне. Длина стержня l_2 должна быть по возможности минимальной в целях уменьшения намагничи-

вающей м. д. с., радиальная высота катушки — не слишком большой, во избежание искажения пиковой кривой вторичного напряжения торцевым потоком окна сердечника трансформатора.

Для определения длины вторичного стержня l_2 можно принять следующее ориентировочное отношение числа витков в слое вторичной катушки к числу слоев в ней:

$$\zeta' = \frac{n_2}{m_2} = 2 \div 3;$$

тогда число витков в слое этой катушки будет:

$$n_2 = \sqrt{\zeta' W_2},$$

и число слоев:

$$m_2 = \frac{W_2}{n_2},$$

где W_2 берется из позиции 3 главы третьей.

Длина вторичного стержня, за-
нимаемая обмоткой (рис. 29)

$$l'_2 = n_2 d_{2н} \text{ [см]}.$$

Полная длина вторичного стержня (рис. 29)

$$l_2 = l'_2 + 2\epsilon_2 \text{ [см]},$$

где $\epsilon_2 = 1,0 \div 2,0 \text{ мм}$ — толщина щеки каркаса вторичной катушки, выполняемой обычно из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824-45).

Толщина вторичной обмотки (рис. 29)

$$\delta_2 = m_2 d_{2н} \text{ [см]}.$$

5. Определение поперечного сечения главного стержня

При нагрузке пикового трансформатора вторичный поток (рис. 25 и 26), вследствие наличия магнитных шунтов, под влиянием вторичного тока несколько смещается по фазе в сторону отставания от первичного потока. Последний равен геометрической сумме вторичного и суммарного потоков через магнитные шунты и торцы окна сердечника. При холостом ходе трансформатора первичный поток практически равен алгебраической сумме указанных потоков. Крутизна кривой вторичного потока во времени в месте прохождения ее через нулевое значение в этом случае увеличивается и пик кривой вторичного напряжения становится более высоким и узким.

Высота пика кривой напряжения при холостом ходе, как показывают осциллограммы, может составлять 1,2—1,4 значе-

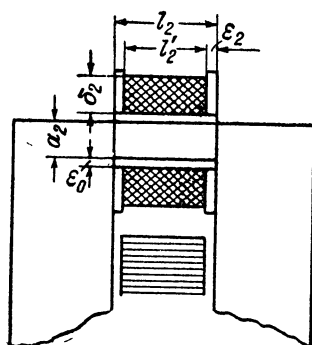


Рис. 29. Размеры вторичной катушки пикового трансформатора

ния его при нагрузке, а ширина основания треугольника, вписанного в этот пик (рис. 27), 0,7—0,9 значения его при нагрузке. Меньшие возрастания пика и уменьшения его ширины при холостом ходе относятся к меньшим значениям средних скоростей изменения вторичного напряжения, а большие возрастания пика и уменьшения его ширины — к большим значениям средних скоростей, указанным в табл. 7.

Таким образом, при холостом ходе пикового трансформатора амплитуда и средняя скорость изменения вторичного напряжения будут:

$$U_{m0} = \mu U_m [\text{в}],$$

$$\xi_0 = \frac{\mu}{\eta} \xi [\text{в}/\text{град}],$$

где U_m и ξ берутся по заданию, $\mu = 1,2 \div 1,4$; $\eta = 0,7 \div 0,9$; при этом μ и η выбираются так, чтобы их произведение было меньше единицы.

Тогда вторичный поток одного стержня при холостом ходе по позиции 3 будет:

$$\Phi_{20} = \Phi_2 \mu \frac{k_0}{k'_0} [\text{мкс}],$$

где Φ_2 берется из позиции 3 главы третьей; k'_0 — коэффициент по уравнению (9) при значениях U_{m0} и ξ_0 .

Амплитуда первичного потока по уравнению (5) будет:

а) для трансформатора стержневого типа (рис. 25)

$$\Phi_1 = \frac{\Phi_{20}}{\sin \frac{(1 - \gamma) U_{m0}}{\xi_0}} [\text{мкс}];$$

б) для трансформатора броневого типа (рис. 26)

$$\Phi_1 = \frac{2\Phi_{20}}{\sin \frac{(1 - \gamma) U_{m0}}{\xi_0}} [\text{мкс}].$$

Поперечное сечение главного стержня:

$$S_1 = \frac{\Phi_1}{B_1} [\text{см}^2],$$

где $B_1 = 10\,000 \div 12\,000$ гс — амплитуда индукции в главном стержне при выполнении его из обыкновенной листовой электротехнической стали.

Форму поперечного сечения главного стержня целесообразно принимать квадратной, а индукцию в ярах равной та-

ковой в этом стержне. Тогда размеры сечения главного стержня будут:

$$a_1 = b_1 = \sqrt{\frac{S_1}{k_3}} \text{ [см]},$$

где $k_3 = 0,88 \div 0,92$ — коэффициент заполнения поперечного сечения стержня сталью.

6. Определение числа витков первичной обмотки

Число витков первичной обмотки трансформатора определяется по известной формуле

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot 10^8}{4,44 f \Phi_1},$$

где Φ_1 берется из позиции 5.

7. Определение сечения и диаметра провода первичной обмотки и размещение ее на главных стержнях

Действующее значение первичного тока пикового трансформатора можно предварительно определить так:

$$I_1 \approx \frac{(1,1 \div 1,3) A W_2}{\sqrt{2} W_1} \text{ [а]},$$

где м. д. с. при холостом ходе, соответствующая участку вторичной магнитной цепи (рис. 25 и 26), при сборке сердечника переплет определяется следующим образом:

а) для трансформатора стержневого типа (рис. 25)

$$A W_2 \approx a w_2 l_2 + a w_{cp} a_1 + 0,8 B_{20} \delta_3;$$

б) для трансформатора броневого типа (рис. 26)

$$A W_2 \approx a w_2 l_2 + a w_{cp} \frac{a_1}{2} + 0,8 B_{20} \delta_3,$$

где

l_2 — берется из позиции 4;

a_1 — из позиции 5;

W_1 — из позиции 6;

$a w_2$ — удельная м. д. с., соответствующая индукции B_{20} , определяемая по кривым намагничивания рис. 41 или 42;

B_{20} — амплитуда индукции во вторичном стержне при холостом ходе трансформатора в гауссах, определяемая по потоку Φ_{20} из позиции 5 и сечению стержня S_2 — из позиции 2;

$\dot{a}w_{\text{ср}}$ —средняя удельная м. д. с. на участке перехода вторичного потока от середины главного стержня или ярма к вторичному стержню:

$$aw_{\text{ср}} \approx \frac{4aw'_2 + aw_2}{6};$$

aw'_2 —удельная м. д. с., соответствующая индукции B'_{20} , определяемая по кривым намагничивания рис. 41 или 42;

B'_{20} —средняя амплитуда индукции на участке перехода вторичного потока от середины главного стержня или ярма к вторичному стержню:

$$B'_{20} = \frac{B_{20}}{2} \left(1 + \frac{b_2}{a_1} \right);$$

δ_s —длина эквивалентного воздушного зазора при сборке сердечника впереплет:

$$\delta_s \approx 0,0035 \div 0,0040 \text{ см};$$

b_2 берется из позиции 2.

Предварительное значение поперечного сечения провода первичной обмотки

$$q'_1 = \frac{I_1}{j_1} [\text{мм}^2],$$

где $j_1 = 1,8 \div 2,4 \text{ а/мм}^2$ —плотность тока в проводе первичной обмотки.

Окончательные значения сечения и диаметра этого провода выбираются по ближайшим данным ГОСТ из приложения I: .

$$q_1 = \dots \text{ мм}^2; \frac{d_1}{d_{1н}} = \dots \text{ мм}.$$

При размещении первичной обмотки на главных стержнях сердечника пикового трансформатора следует иметь в виду, что длина вторичного стержня l_2 (рис. 25 и 26) является ограниченной, и поэтому ширина окна сердечника в некоторых случаях может оказаться недостаточной для удобного размещения этой обмотки. Так, например, в трансформаторах стержневого типа для рационального размещения первичной и регулировочной обмоток на главных стержнях обычно приходится в этом месте расширять окно сердечника (рис. 25). В трансформаторах броневого типа ширина окна, определяемая длиной вторичного стержня, оказывается обычно достаточной (рис. 26).

а) Трансформатор стержневого типа (рис. 25).
Длина, занимаемая первичной обмоткой по высоте главного стержня, обычно составляет:

$$l_1 \approx (1,2 \div 1,6) a_1 \text{ [см]},$$

где a_1 берется из позиции 5.

Число витков первичной обмотки в одном слое

$$n_1 = \frac{l_1 - 2\varepsilon_1}{d_{1и}},$$

где $\varepsilon_1 = 1,0 \div 2,0$ мм — толщина щеки каркаса первичной катушки, выполняемой обычно из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824-45).

Число слоев первичной обмотки на стержне

$$m_1 = \frac{W_1}{2n_1}.$$

Толщина первичной обмотки

$$\delta_1 = m_1 d_{1и} \text{ [см]}.$$

Ширина окна сердечника трансформатора в месте размещения первичной обмотки

$$b = 2(\varepsilon'_0 + \delta_1) + \varepsilon_3 \text{ [см]},$$

где

W_1 — берется из позиции 6;

ε'_0 — толщина изоляции между первичной катушкой и стержнем, выполняемой обычно из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824-45):

$$\varepsilon'_0 = 1,0 \div 1,5 \text{ мм};$$

ε_3 — расстояние между первичными катушками двух стержней в окне сердечника трансформатора:

$$\varepsilon_3 = 3,0 \div 4,0 \text{ мм}.$$

б) Трансформатор броневого типа (рис. 26).

Число слоев первичной обмотки на стержне

$$m_1 = \frac{l_2 - \varepsilon'_0 - \varepsilon_3}{d_{1и}}$$

с округлением до ближайшего целого числа.

Число витков первичной обмотки в одном слое

$$n_1 = \frac{W_1}{m_1}.$$

Длина, занимаемая первичной обмоткой по высоте главного стержня

$$l_1 = n_1 d_{1и} + 2\varepsilon_1 \text{ [см]}.$$

Толщина первичной обмотки

$$\delta_1 = m_1 d_{1н} [\text{см}],$$

где l_2 берется из позиции 4, W_1 — из позиции 6, ϵ'_0 , ϵ_1 и ϵ_3 — как и в случае трансформатора стержневого типа.

В пиковых трансформаторах с регулируемой фазой вторичного напряжения (рис. 25, б и 26, б) при определении окончательной длины главных стержней необходимо предусмотреть соответствующее место для размещения дополнительных магнитных шунтов и регулировочной обмотки, как показано ниже.

8. Определение размеров магнитных шунтов нерегулируемых трансформаторов

а) Трансформатор стержневого типа (рис. 25, а).

Из рис. 25, а для амплитуд потоков при холостом ходе следует:

$$\Phi_1 = \Phi_{20} + \Phi'_0 + \Phi'_{s0}.$$

Так как на всех трех параллельных участках (рис. 25, а) практически действует м. д. с. AW_2 , определяемая позицией 7а, то можно написать:

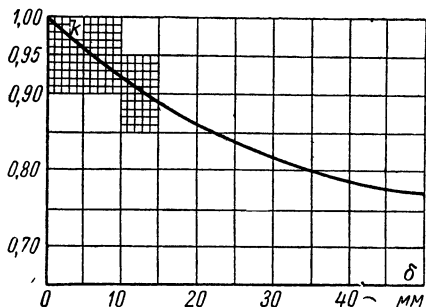


Рис 30. Кривая коэффициента k

$$\begin{aligned} AW_2 &= 0,8 \frac{\Phi'_0}{S'} k_2 l_2 = \\ &= 0,8 \frac{\Phi'_{s0}}{S'_s} \cdot 2\delta'_s k'_s, \end{aligned}$$

где

S' — сечение торца окна между вторичным стержнем и магнит-

ным шунтом в см^2 , определяемое из условия размещения вторичной катушки:

$$S' = b_1 b' + (b_1 - b_2) a_2;$$

S'_s — поперечное сечение магнитного шунта, параллельное торцу окна сердечника, см^2 ;

δ'_s — длина одностороннего воздушного зазора магнитного шунта, см ;

k_2 и k'_s — коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения потока у краев воздушных зазоров, определяемые по кривой рис. 30.

После преобразования написанных в этой позиции уравнений получается:

$$\frac{S'_s}{\delta'_s k'_s} = \frac{1,6 (\Phi_1 - \Phi_{20})}{AW_2} - \frac{2S'}{k_2 l_2},$$

где $\delta'_s = (0,02 \div 0,10) l_2$; a_2 и b_2 берутся из позиции 2, l_2 — из позиции 4, Φ_1 , Φ_{20} и b_1 — из позиции 5, AW_2 — из позиции 7а, b' — согласно рис. 25, а.

Задаваясь значением δ'_s и определяя коэффициенты k'_s и k_2 по кривой рис. 30, можно вычислить поперечное сечение магнитного шунта S'_s и толщину пакета его b'_s (рис. 25, а).

б) Трансформатор броневое типа (рис. 26, а).

Из рис. 26, а для амплитуд потоков при холостом ходе следует:

$$\frac{\Phi_1}{2} = \Phi_{20} + \Phi'_0 + \Phi'_{s0},$$

тогда, как и в случае трансформатора стержневого типа, получается:

$$\frac{S'_s}{\delta'_s k'_s} = \frac{0,8 (\Phi_1 - 2\Phi_{20})}{AW_2} - \frac{2S'}{k_2 l_2},$$

где значения δ'_s , k'_s , k_2 , S' и другие определяются, как и в предыдущем случае, а AW_2 берется из позиции 7б.

9. Определение числа витков, диаметра провода и размещение на главном стержне регулировочной обмотки регулируемых трансформаторов

Как указывалось, регулирование фазы вторичного напряжения пикового трансформатора осуществляется с помощью дополнительной обмотки, помещаемой на главных стержнях между первичной и вторичной обмотками (рис. 25, б и 26, б). Число витков и диаметр провода этой обмотки определяются из следующих условий. Расчет и опыт показывают, что для получения регулирования фазы пиковой кривой вторичного напряжения θ_m в пределах от 0 до 90° нужно, чтобы поток Φ_p через регулировочную обмотку и э. д. с. ее E_p при холостом ходе составляли приблизительно 0,6—0,7 соответствующих значений первичной цепи, т. е.

$$\Phi_p = (0,6 \div 0,7) \Phi_1,$$

$$E_p = (0,6 \div 0,7) U_1.$$

В этом случае, для обеспечения возможности регулирования тока в регулировочной обмотке в широких пределах с помощью добавочного сопротивления в ее цепи (рис. 25,а и 26,а), число витков этой обмотки можно принять равным числу витков первичной обмотки: $W_p = W_1$.

Максимальная амплитуда м. д. с. регулировочной обмотки AW_{pm} зависит от величины наибольшего сдвига фазы вторичного напряжения θ_m . При принятых соотношениях $\frac{\Phi_p}{\Phi_1} = \frac{E_p}{U_1} = 0,6 \div 0,7$ в табл. 8 дано отношение этой м. д. с. к м. д. с. AW_2 , определяемой позицией 7а или 7б.

Наибольший ток регулировочной обмотки будет:

Таблица 8

θ_m в градусах	$\frac{AW_{pm}}{AW_2}$
30	0,9—1,0
50	1,1—1,3
70	1,4—1,6
90	1,7—1,8

$$I_{pm} = \frac{AW_{pm}}{\sqrt{2} W_p} [a].$$

Предварительное значение поперечного сечения провода регулировочной обмотки

$$q'_p = \frac{I_{pm}}{I_{pm}} [мм^2],$$

где $j_{pm} = 2,5 \div 3,0$ а/мм²—наибольшая плотность тока в проводе регулировочной обмотки.

Окончательные значения сечения и диаметра этого провода выбираются по ближайшим данным ГОСТ из приложения I:

$$q_p = \dots \dots \dots мм^2; \quad \frac{d_p}{d_{pn}} = \dots \dots \dots мм.$$

При размещении регулировочной обмотки на главных стержнях сердечника следует учесть замечания, указанные в позиции 7 при размещении первичной обмотки.

а) Трансформатор стержневого типа (рис. 25,б).

Принимая радиальную толщину регулировочной обмотки приблизительно равной толщине δ_1 первичной, получим следующее число слоев регулировочной обмотки на стержне:

$$m_p = \frac{\delta_1}{d_{pn}}$$

с округлением до ближайшего целого числа.

Число витков регулировочной обмотки в одном слое

$$n_p = \frac{W_p}{2m_p}.$$

Длина, занимаемая регулировочной обмоткой по высоте главного стержня

$$l_p = n_p d_{pn} + 2\varepsilon_1,$$

где $\varepsilon_1 = 1,0 \div 2,0$ мм — толщина щеки каркаса регулировочной обмотки из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824-45).

б) Трансформатор броневое типа (рис. 26,б).

Как и в предыдущем случае, можно написать:

$$m_p = \frac{\delta_1}{d_{pn}}; \quad n_p = \frac{W_p}{m_p},$$

и длина, занимаемая регулировочной обмоткой по высоте стержня, будет:

$$l_p = n_p d_{pn} + 2\varepsilon_1,$$

где ε_1 — как и в случае трансформатора стержневого типа.

Сечение торца окна трансформатора, занимаемого регулировочной обмоткой (рис. 25,б и 26,б)

$$S'' = b_1 l_p,$$

где b_1 берется из позиции 5.

10. Определение размеров магнитных шунтов регулируемых трансформаторов

Как и в случае нерегулируемых трансформаторов, на основании картины потоков рис. 25,б и 26,б, здесь получаются следующие формулы для определения размеров магнитных шунтов.

а) Трансформатор стержневого типа (рис. 25,б).

Общая сумма отношений поперечных сечений верхнего и нижнего магнитных шунтов к длинам воздушных зазоров между каждым из них и торцем окна трансформатора:

$$\frac{S'_s}{\delta'_s k'_s} + \frac{S''_s}{\delta''_s k''_s} = \frac{1,6 (\Phi_1 - \Phi_{20})}{AW_2} - \frac{2S'}{k_2 l_2} - \frac{2S''}{k'_2 b} - \frac{2S'''}{k''' \delta'''},$$

где

k'_s, k''_s, k_2, k'_2 и k''' — берутся по кривой рис. 30, l_2 — из позиции 4, Φ_1 и Φ_{20} — из позиции 5, b — из позиции 7, AW_2 — из позиции 7а, δ'_s и S' — из позиции 8, S'' — из позиции 9;

$S''' = a_1 b_{yr}$ — сечение воздушного зазора ($см^2$), параллельное боковой поверхности ярма и плоскости сжимающей консоли из углового железа (рис. 32);

$\delta''' \geq 0,75 l_2$ — длина одностороннего воздушного зазора между ярмом и плоскостью угольника, $см$;

δ_s'' —длина одностороннего воздушного зазора нижнего магнитного шунта, см:

$$\delta_s'' = (0,05 \div 0,20) l_2.$$

Задавая значения δ_s' и δ_s'' и определяя k_s' , k_s'' , k_2 , k_2' и k''' по кривой рис. 30, можно вычислить поперечные сечения верхнего и нижнего магнитных шунтов S_s' и S_s'' и толщины пакетов их b_s' и b_s'' (рис. 25,б), принимая по конструктивным соображениям эти сечения одинаковыми.

б) Трансформатор броневого типа (рис. 26,б).

Общая сумма отношений поперечных сечений верхнего и нижнего магнитных шунтов к длинам воздушных зазоров их:

$$\frac{S_s'}{\delta_s' k_s'} + \frac{S_s''}{\delta_s'' k_s''} = \frac{0,8 (\Phi_1 - 2\Phi_{20})}{AW_2} - \frac{2(S' + S'')}{k_2 l_2} - \frac{S'''}{k''' \delta'''},$$

где значения δ_s' , δ_s'' , δ''' , k_s' , k_s'' , k''' , S' , S'' , S''' и другие определяются, как и в предыдущем случае, а AW_2 берется из позиции 7б.

После размещения первичной и регулировочной обмоток на главных стержнях сердечника трансформатора и определения размеров магнитных шунтов можно вычислить полную высоту окна сердечника:

а) для трансформатора стержневого типа (рис. 25,б)

$$H = l_1 + b_s' + l_p \text{ [см];}$$

б) для трансформатора броневого типа (рис. 26,б)

$$H = l_1 + b_s'' + l_p + b_s' + b' \text{ [см]},$$

где l_1 берется из позиции 7, b_s' —из позиции 8 или 10, l_p —из позиции 9, b_s'' —из позиции 10, b' —согласно рис. 26,б.

11. Построение пиковой кривой вторичного напряжения во времени при холостом ходе

Графическое построение пиковой кривой вторичного напряжения во времени производится по кривой вторичного потока во времени, полученной с помощью кривых намагничивания полной и вторичной магнитных цепей трансформатора. Для вычисления кривых намагничивания следует вычертить полный эскиз сердечника трансформатора (рис. 25 или 26). В целях удобства этого вычисления составляется табл. 9, в которой задаются индукциями во вторичном стержне B_2 при холостом ходе трансформатора и определяют все величины, указанные в таблице.

Далее строятся кривые намагничивания $\varphi_1 = f_1(AW_1)$ и $\varphi_2 = f_2(AW_2)$ в удобных масштабах, кривая во времени первичного потока $\varphi_1 = \Phi_1 \sin \omega t$, а с помощью последней и кривых намагничивания φ_1 и φ_2 — кривая $\varphi_2 = f(\omega t)$ (кривая 2' на рис. 31). Так как вторичная э. д. с. $e_2 = -W_2 \frac{d\varphi_2}{dt} \cdot 10^{-8}$ [в], то для получения последней необходимо произвести графическое дифференцирование кривой 2'. Это дифференцирование состоит в построении кривой э. д. с. $e_2 = f(\omega t)$ по ординатам, величина которых находится для разных точек искомой кривой с помощью касательных, проводимых к кривой 2' (рис. 31). Если за единицу масштаба по оси абсцисс принять величину $\frac{OT}{\pi}$, где OT — период в миллиметрах кривой вторичного потока $\varphi_2 = f(\omega t)$, то масштаб ординат кривой э. д. с. $e_2 = f(\omega t)$ будет:

$$1 \text{ мм} = 2\pi f W_2 q_2' \cdot 10^{-8} [\text{в}],$$

при этом q_2' [мкс] — масштаб ординат потока φ_2 , f — частота [гц] питающей сети.

На рис. 31 выполнено графическое дифференцирование кривой 2' для трансформатора, рассчитанного ниже в числовом примере. Точность графического дифференцирования определяется степенью точности проведения касательных к кривой 2'. Наиболее важной является касательная в точке прохождения кривой 2' через нуль, так как она определяет высоту пика кривой э. д. с. $e_2 = f(\omega t)$. Для проведения ее рекомендуется следующий способ. Из точки O кривой 2' (рис. 31) как центра проводится полуокружность радиусом 3—4 мм и на ней этим же радиусом, начиная от кривой, делаются две последовательные засечки. Из последних по обе стороны полуокружности делается еще по две засечки другим радиусом. Через них и центр полуокружности проводится прямая, являющаяся нормалью к кривой 2' в точке O . Перпендикуляр к этой нормали в точке O и представляет искомую касательную. Отложив из точки O по оси абсцисс единицу масштаба $OO'' = \frac{OT}{\pi}$ и проведя вертикаль через конец этого отрезка до пересечения ее с касательной, получают прямоугольный треугольник $OO'O''$, катет которого $O'O''$ представляет абсолютное значение высоты пика кривой э. д. с. $e_2 = f(\omega t)$. Эта ордината искомой кривой $O'O'' = OO_1$ откладывается соответственно абсциссе O исходной кривой 2' без учета знака производной в формуле для э. д. с. e_2 .

Касательные к другим точкам кривой 2' проводятся аналогично, только вместо полуокружности из какой-нибудь точки кривой делаются на ней две засечки радиусом 2—3 мм и к полученному элементу кривой проводится нормаль. Перпенди-

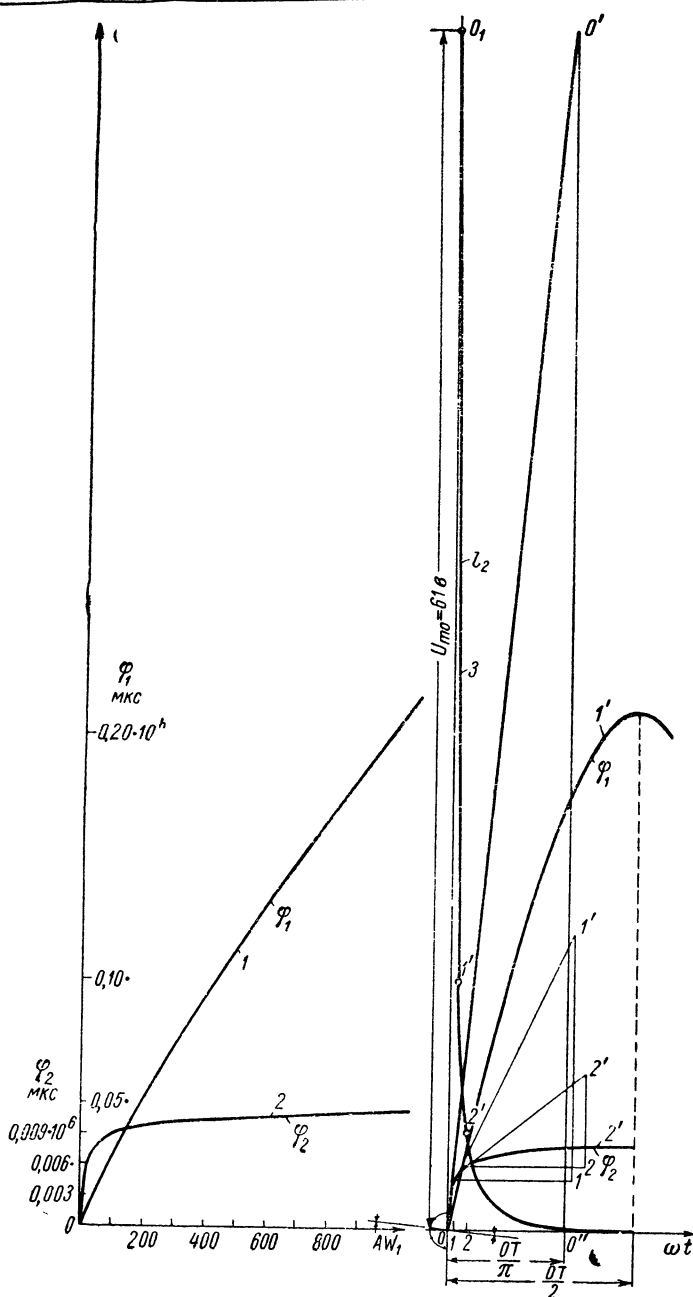


Рис. 31. Построение пиковой кривой вторичной э. д. с. трансформатора

B_2
$B'_2 = \frac{B_2}{2} \left(1 + \frac{b_2}{a_1} \right)$
$aw_{cp} = \frac{aw_2 + 4aw'_2}{6}$
$AW_2 \approx aw_2 l_2 + aw_{cp} a_1 + 0,8 B_2 \delta_9$
$B' = \frac{AW_2}{0,8 k_2 l_2}$
$B'_s = \frac{AW_2}{0,8 \cdot 2\delta'_s k'_s}$
$B'' = \frac{AW_2}{0,8 k'_2 b}$
$B''_s = \frac{AW_2}{0,8 \cdot 2\delta''_s k''_s}$
$B''' = \frac{AW_2}{0,8 \cdot 2\delta'''_s k'''_s}$
$B_1 = \frac{B_2 S_2 + B'_s S'_1 + B''_s S''_1}{S_1} + \frac{B'' S'' + B''_s S''_1 + 2B''' S'''_1}{S_1}$
$AW'_1 = aw_1 (2l_1 + l_3) + 1,6 B_1 \delta_9$
$AW_1 = AW'_1 + AW_2$
$\varphi_2 = B_2 S_2$
$\varphi_1 = B_1 S_1$
$\iota_1 = \frac{AW_1}{W_1}$

B_2
$B'_2 = \frac{B_2}{2} \left(1 + \frac{b_2}{a_1} \right)$
$aw_{cp} = \frac{aw_2 + 4aw'_2}{6}$
$AW_2 \approx aw_2 l_2 + aw_{cp} \frac{a_1}{2} + 0,8 B_2 \delta_9$
$B' = B'' = \frac{AW_2}{0,8 k_2 l_2}$
$B'_s = \frac{AW_2}{0,8 \cdot 2\delta'_s k'_s}$
$B''_s = \frac{AW_2}{0,8 \cdot 2\delta''_s k''_s}$
$B''' = \frac{AW_2}{0,8 \cdot 2\delta'''_s k'''_s}$
$B_1 = \frac{2(B_2 S_2 + B'_s S'_1 + B''_s S''_1)}{S_1} + \frac{2(B'' S'' + B''_s S''_1 + 2B''' S'''_1)}{S_1}$
$AW'_1 = aw_1 (2l_1 + l_3) + 1,6 B_1 \delta_9$
$AW_1 = AW'_1 + AW_2$
$2\varphi_2 = 2B_2 S_2$
$\varphi_1 = B_1 S_1$
$\iota_1 = \frac{AW_1}{W_1}$

куляр к нормали в данной точке кривой и будет представлять касательную. В каждой из этих точек кривой строятся прямоугольные треугольники $11'1''$, $22'2''$ и т. д., у которых горизонтальные катеты представляют отрезок $\frac{OT}{\pi}$, а вертикальные — абсолютные значения ординат искомой кривой э. д. с. $e_2 = f(\omega t)$. Последние и откладываются от оси абсцисс в виде отрезков $11'$, $22'$ и т. д., соответственно абсциссам $1, 2$ и т. д. кривой $2'$ (рис. 31). После соединения точек O_1 , $1'$, $2'$ и т. д. получается искомая кривая $\mathcal{Z}$ вторичной э. д. с. $e_2 = f(\omega t)$, повернутая на 180° по отношению к истинному положению этой кривой во времени.

12. Средние длины витков обмоток трансформатора

Так как в пиковых трансформаторах поперечные сечения вторичных и первичных стержней выполняются прямоугольной формы, то при цилиндрических обмотках средние длины витков их можно представить следующим образом:

средняя длина витка вторичной обмотки

$$l_{w2} = 2(a_2 + b_2 + 4\epsilon_0'' + 2\delta_2) \text{ [см]},$$

средние длины витков первичной и регулировочной обмоток

$$l_{w1} = l_{wp} = 2(a_1 + b_1 + 4\epsilon_0' + 2\delta_1) \text{ [см]},$$

где

a_2 и b_2 — берутся из позиции 2;

δ_2 — из позиции 4;

a_1 и b_1 — из позиции 5;

δ_1 и ϵ_0' — из позиции 7;

$\epsilon_0'' = 0,5 \div 1,0 \text{ мм}$ — толщина изоляции между вторичной катушкой и стержнем, выполняемой обычно из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824-45).

13. Вес меди и активные сопротивления обмоток

Вес меди вторичной обмотки

$$G_{m2} = 8,9 W_2' q_2 l_{w2} \cdot 10^{-5} \text{ [кг]};$$

вес меди первичной обмотки

$$G_{m1} = 8,9 W_1 q_1 l_{w1} \cdot 10^{-5} \text{ [кг]};$$

вес меди регулировочной обмотки

$$G_{mp} = 8,9 W_p q_p l_{wp} \cdot 10^{-5} \text{ [кг]};$$

общий вес меди обмоток

$$G_m = G_{m1} + G_{m2} + G_{mp} \text{ [кг]}.$$

Активные сопротивления первичной, вторичной и регулировочной обмоток трансформатора при 75°С будут:

$$r_1 = 1,22 \cdot \frac{W_1 l_{w1}}{5700 q_1} \text{ [ом]},$$

$$r_2 = 1,22 \cdot \frac{W_2' l_{w2}}{5700 q_2} \text{ [ом]},$$

$$r_p = 1,22 \cdot \frac{W_p l_{wp}}{5700 q_p} \text{ [ом]},$$

где

$W_2' = W_2$ — трансформатор стержневого типа (рис. 25);

$W_2' = 2W_2$ — трансформатор броневое типа (рис. 26);

W_2 — берется из позиции 3 главы третьей, q_2 — из позиции 4, W_1 — из позиции 6, q_1 — из позиции 7, W_p и q_p — из позиции 9, l_{w1} , l_{w2} , l_{wp} — из позиции 12.

14. Потери в меди обмоток при 75°С

$$P_{m1} = I_1^2 r_1 \text{ [вт]},$$

$$P_{m2} = I_2^2 r_2 \text{ [вт]},$$

$$P_{mp} = I_{pm}^2 r_p \text{ [вт]},$$

$$P_m = P_{m1} + P_{m2} + P_{mp} \text{ [вт]},$$

где I_2 берется по заданию, I_1 — из позиции 7 с последующим уточнением в позиции 17, I_{pm} — из позиции 9, r_1 , r_2 и r_p — из позиции 13.

15. Вес стали сердечника трансформатора

а) Трансформатор стержневого типа (рис. 25):
вес стали вторичного стержня

$$G_{c2} = 7,8 S_2 l_2 \cdot 10^{-3} \text{ [кг]},$$

вес стали первичных стержней

$$G_{c1} = 2 \cdot 7,8 (l_1 + l_p + b_s') S_1 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 7,8 (b_s' + b' + a_2) S_1' \cdot 10^{-3} \text{ [кг]},$$

вес стали ярма

$$G_{cя} = 7,8 S_1 l_3 \cdot 10^{-3} \text{ [кг]},$$

вес стали магнитных шунтов

$$G'_{cs} = 7,8 S'_s (l_2 - 2\delta'_s) 10^{-3} [\kappa z];$$

$$G''_{cs} = 7,8 S''_s (b - 2\delta''_s) 10^{-3} [\kappa z].$$

б) Трансформатор броневое типа (рис. 26):
вес стали вторичных стержней

$$G_{c2} = 2 \cdot 7,8 S_2 l_2 \cdot 10^{-3} [\kappa z],$$

вес стали первичного стержня

$$G_{c1} = 7,8 (l_1 + l_p + b'_s + b'_s + b' + a_2) S_1 \cdot 10^{-3} [\kappa z],$$

вес стали ярем

$$G_{cя} = 7,8 (l_1 + l_p + b'_s + b'_s + b' + a_2) S_1 \cdot 10^{-3} + 7,8 l_3 S_1 \cdot 10^{-3} [\kappa z],$$

вес стали магнитных шунтов

$$G'_{cs} = 2 \cdot 7,8 S'_s (l_2 - 2\delta'_s) 10^{-3} [\kappa z],$$

$$G''_{cs} = 2 \cdot 7,8 S''_s (l_2 - 2\delta''_s) 10^{-3} [\kappa z],$$

общий вес стали сердечника трансформатора

$$G_c = G_{c1} + G_{c2} + G_{cя} + G'_{cs} + G''_{cs} [\kappa z],$$

где

$$S'_1 = k_3 b_1 (l_3 - b) [cm^2];$$

S_2 и a_2 берутся из позиции 2, l_2 —из позиции 4, S_1 , b_1 и k_3 —из позиции 5, l_1 и b —из позиции 7, S'_s , δ'_s и b'_s —из позиции 8 или 10, l_p —из позиции 9, S''_s , δ''_s и b''_s —из позиции 10, b' и l_3 —согласно рис. 25 или 26.

16. Потери в стали сердечника

а) Трансформатор стержневого типа (рис. 25):
потери в стали вторичного стержня

$$P_{c2} = k_c \left(\frac{B_2}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G_{c2} [\text{вт}];$$

потери в стали части первичных стержней, охватываемой первичной обмоткой, и яреме:

$$P'_{c1} = k_c \left(\frac{B_1}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} (G'_{c1} + G_{cя}) [\text{вт}];$$

потери в стали остальной части первичных стержней

$$P''_{c1} \approx k_c \left(\frac{B_1}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G''_{c1} [\text{вт}];$$

потери в стали магнитных шунтов

$$P'_{cs} = k_c \left(\frac{B'_s}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G'_{cs} \quad [вт],$$

$$P''_{cs} = k_c \left(\frac{B''_s}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G''_{cs} \quad [вт],$$

где

$$G'_{c1} = 2,7,8 S_1 l_1 \cdot 10^{-3} \quad [\kappa\tau]; \quad G''_{c1} = G_{c1} - G'_{c1} \quad [\kappa\tau]; \quad B'_1 \approx \frac{B_1}{2} \quad [гс].$$

б) Трансформатор бронёвого типа (рис. 26):
потери в стали вторичных стержней:

$$P_{c2} = k_c \left(\frac{B_2}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G_{c2} \quad [вт];$$

потери в стали части первичного стержня, охватываемого первичной обмоткой, и части ярем

$$P'_{c1} = k_c \left(\frac{B_1}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} (G'_{c1} + G'_{cя}) \quad [вт];$$

потери в стали остальной части первичного стержня и ярем

$$P''_{c1} \cong k_c \left(\frac{B'_1}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} (G''_{c1} + G''_{cя}) \quad [вт],$$

где

$$G'_{c1} = 7,8 S_1 l_1 \cdot 10^{-3} \quad [\kappa\tau]; \quad G'_{cя} = 7,8 S_1 (l_1 + l_3) 10^{-3} \quad [\kappa\tau];$$

$$G''_{c1} = G_{c1} - G'_{c1} \quad [\kappa\tau]; \quad G''_{cя} = G_{cя} - G'_{cя} \quad [\kappa\tau]; \quad B'_1 \approx \frac{B_1}{2} \quad [\kappa\tau].$$

Потери в стали магнитных шунтов определяются, как и в случае трансформатора стержневого типа, с учетом веса стали шунтов по позиции 15б.

Общие потери в стали сердечника трансформатора

$$P_c = P_{c2} + P'_{c1} + P''_{c1} + P'_{cs} + P''_{cs} \quad [вт],$$

где

$$B'_s \approx \frac{AW_2}{0,8 \cdot 2\delta_s k_s} \quad [гс]; \quad B''_s = \frac{AW_2}{0,8 \cdot 2\delta_s k_s} \quad [гс];$$

f — частота берется по заданию, B_2 — из позиции 2, B_1 и S_1 — из позиции 5, AW_2 и l_1 из позиции 7, δ'_s и k'_s — из позиции 8 или 10, δ''_s и k''_s — из позиции 10, G_{c1} , G_{c2} , $G_{cя}$, G'_{cs} и G''_{cs} — из позиции 15, l_3 — согласно рис. 25 или 26.

Удельные потери в стали k_c при $B=10000$ гс и $f=50$ гц в зависимости от марки стали при толщине листа 0,35 мм по ГОСТ 802-54 имеют следующие значения:

марка стали Э41 (старые марки Э4 и Э4А) — $k_c=1,35$ вт/кг;
марка стали Э42 (старая марка Э4АА) — $k_c=1,20$ вт/кг.

17. Определение тока холостого хода трансформатора

В пиковых трансформаторах ток холостого хода практически является рабочим током первичной цепи, который почти не изменяется при изменении нагрузки вторичной обмотки от нуля до полной. Ток холостого хода этого трансформатора определяется величиной потерь в стали сердечника P_c и значением намагничивающей м. д. с. первичной обмотки $AW_1 = AW'_1 + AW_2$. Величина м. д. с. AW_1 берется из табл. 9 при номинальном значении индукции B_2 во вторичном стержне, принятой в позиции 2. При этом условии ток холостого хода или первичный ток трансформатора определится следующим образом:

активная составляющая тока

$$I_{oa} = \frac{P_c}{U_1} [a],$$

реактивная составляющая тока

$$I_{or} = \frac{AW_1}{\sqrt{2} W_1} [a],$$

ток холостого хода

$$I_o = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{or}^2} [a],$$

первичный ток трансформатора практически

$$I_1 \approx I_o,$$

где U_1 — первичное напряжение берется по заданию, W_1 — из позиции 6, P_c — из позиции 16 и AW_1 — из табл. 9.

18. Проверка трансформатора на нагревание

Потери в пиковом трансформаторе сосредоточены в основном в меди первичной и регулировочной обмоток и в стали сердечника. Ввиду наличия достаточного теплообмена между обмотками и сердечником, превышение температуры их над температурой окружающей среды без большой погрешности практически можно определить по формуле

$$\theta \approx \frac{P_{m1} + P_{mp} + P_c}{\alpha_0(S_{сер} + S_{обм})} + \Delta\theta^\circ [^\circ\text{C}],$$

где

$P_{м1}$ и $P_{мр}$ — потери в меди первичной и регулировочной обмоток в ваттах из позиции 14, P_c — потери в стали сердечника в ваттах из позиции 16;

$\alpha_0 = (13 \div 15) 10^{-4}$ — средний коэффициент теплоотдачи открытой поверхности обмоток и сердечника в $вт/см^2 \text{ град}$;

$\Delta\theta^\circ$ — перепад температуры от внутренних слоев обмоток к наружным, который приближенно для пропитанных лаком обмоток может быть принят $10-15^\circ \text{ C}$;

$S_{сер}$ и $S_{обм}$ — открытые поверхности сердечника и обмоток трансформатора в $см^2$.

Величины открытых поверхностей сердечника и обмоток пикового трансформатора могут быть определены по формулам:

а) для трансформатора стержневого типа (рис. 25)

$$S_{сер} \approx 2(a_1 + b_s'' + b_s' + b' + a_2 + l_3)b_1 - l_2b_1 \text{ [см}^2\text{]};$$

$$S_{обм} \approx 4(a_1 + b_1 + 4\epsilon_0' + 4\delta_1)(l_1 + l_p) \text{ [см}^2\text{]};$$

б) для трансформатора броневого типа (рис. 26)

$$S_{сер} \approx 2\left(\frac{a_1}{2} + l_1 + b_s'' + l_p + b_s' + b' + a_2 + 2l_3\right)b_1 - 2l_2b_1 \text{ [см}^2\text{]};$$

$$S_{обм} \approx 2(a_1 + b_1 + 4\epsilon_0' + 4\delta_1)(l_1 + l_p) \text{ [см}^2\text{]},$$

где a_2 берется из позиции 2, l_2 — из позиции 4, a_1 и b_1 — из позиции 5, ϵ_0' , δ_1 и l_1 — из позиции 7, l_p — из позиции 9, b_s' и b_s'' — из позиции 10, b' и l_3 — согласно рис. 25 или 26.

III. ПРИМЕР РАСЧЕТА РЕГУЛИРУЕМОГО ПИКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Задание

Первичное напряжение $U_1 = 120 \text{ в}$.

Амплитуда вторичного пикового напряжения при нагрузке $U_m = 50 \text{ в}$.

Действующее значение вторичного тока нагрузки $I_2 = 0,10 \text{ а}$.

Средняя скорость изменения вторичного напряжения при нагрузке $\xi = 15 \text{ в/град}$.

Частота питающей сети $f = 50 \text{ гц}$.

Наибольший сдвиг фазы вторичного напряжения $\theta_m = 70^\circ$.

Произведение коэффициентов формы кривой и амплитуды вторичного пикового напряжения при выполнении вторичного

стержня из электротехнической стали марки Э42 толщиной листа 0,35 мм (ГОСТ 802-54) по формуле (9) будет:

$$k_0 = k_a k_f = \frac{180\xi}{1,5U_m + 90\xi} = \frac{180 \cdot 15}{1,5 \cdot 50 + 90 \cdot 0,05 \cdot 15} = 18,9,$$

где по формуле (3а):

$$\beta = \frac{1,5}{15 + \xi} = \frac{1,5}{15 + 15} = 0,05.$$

1. *Тип пикового трансформатора.* Конструкцию сердечника пикового трансформатора выбираем стержневого типа с магнитными шунтами (рис. 25,б).

Материал сердечника—листовая электротехническая сталь марки Э42 (старая марка Э4АА) толщиной листа 0,35 мм (ГОСТ 802-54).

2. *Поперечное сечение вторичного стержня трансформатора*

$$S_2 = 5,4 \sqrt{\frac{U_m I_2 a \cdot 10^4}{k_0 f I_2 B_2}} = 5,4 \sqrt{\frac{50 \cdot 0,1 \cdot 4,2 \cdot 10^4}{18,9 \cdot 50 \cdot 2,2 \cdot 19500}} = 0,40 \text{ мм}^2,$$

где принято:

$$\alpha = 4,2; j_2 = 2,2 \text{ а/мм}^2; B_2 = 19500 \text{ гс}.$$

Размеры поперечного сечения

$$a_2 = \sqrt{\frac{S_2}{k_3 \zeta}} = \sqrt{\frac{0,40}{0,90 \cdot 3,6}} = 0,35 \text{ см};$$

$$b_2 = \zeta a_2 = 3,6 \cdot 0,35 = 1,3 \text{ см},$$

где принято:

$$k_3 = 0,9; \zeta = 3,6.$$

3. *Число витков вторичной обмотки*

$$W_2 = \frac{U_m \cdot 10^8}{4 k_0 f \Phi_2} = \frac{50 \cdot 10^8}{4 \cdot 18,9 \cdot 50 \cdot 0,0078 \cdot 10^6} \approx 170,$$

где

$$\Phi_2 = B_2 S_2 = 19500 \cdot 0,40 = 0,0078 \cdot 10^6 \text{ мкс}.$$

4. *Сечение и диаметр провода вторичной обмотки и длина вторичного стержня.* Предварительное значение поперечного сечения провода вторичной обмотки:

$$q'_2 = \frac{I_2}{I_2} = \frac{0,10}{2,2} = 0,0455 \text{ мм}^2,$$

где ранее принято:

$$j_2 = 2,2 \text{ а/мм}^2,$$

Окончательно по ГОСТ 7262-54 из приложения I принимаем:

$$q_2 = 0,0440 \text{ мм}^2; \frac{d_2}{d_{2н}} = \frac{0,25}{0,30} \text{ мм}; \text{ марка провода ПЭВ-2.}$$

Число витков в слое катушки

$$n_2 = \sqrt{\zeta' W_2} = \sqrt{2,3 \cdot 170} = 20;$$

число слоев

$$m_2 = \frac{W_2}{n_2} = \frac{170}{20} \approx 9,$$

где принято:

$$\zeta' = 2,3.$$

Длина вторичного стержня, занимаемая обмоткой (рис. 29)

$$l'_2 = n_2 d_{2н} = 20 \cdot 0,03 = 0,6 \text{ см};$$

полная длина вторичного стержня (рис. 29)

$$l_2 = l'_2 + 2\varepsilon_2 = 0,6 + 2 \cdot 0,15 = 0,9 \text{ см},$$

где толщина щеки каркаса принята: $\varepsilon_2 = 1,5 \text{ мм}$; электрокартон ЭВ (ГОСТ 2824-45).

Толщина вторичной обмотки (рис. 29)

$$\delta_2 = m_2 d_{2н} = 9 \cdot 0,03 = 0,27 \text{ см}.$$

5. Поперечное сечение главного стержня.

Амплитуда и средняя скорость нарастания вторичного пикового напряжения при холостом ходе

$$U_{m0} = \mu U_m = 1,2 \cdot 50 = 60 \text{ в}; \quad \xi_0 = \frac{\mu}{\eta} \xi = \frac{1,2}{0,9} \cdot 15 = 20,0 \text{ в/град};$$

амплитуда вторичного потока при холостом ходе

$$\Phi_{20} = \Phi_{2л} \frac{k'_0}{k_0} = 0,0078 \cdot 10^8 \cdot 1,2 \cdot \frac{18,9}{21,6} = 0,0082 \cdot 10^8 \text{ мкс},$$

где по формуле (9) $k'_0 = 21,6$ при $\xi_0 = 20,0 \text{ в/град}$;
амплитуда первичного потока по позиции 5 а

$$\Phi_1 = \frac{\Phi_{20}}{\sin \frac{(1-\gamma) U_{m0}}{\xi_0}} = \frac{0,0082 \cdot 10^8}{\sin \frac{(1-0,26) 60}{20,0}} = 0,21 \cdot 10^8 \text{ мкс},$$

где по формуле (3а)

$$\gamma = \frac{13}{30 + \xi_0} = \frac{13}{30 + 20} = 0,26.$$

Поперечное сечение главного стержня

$$S_1 = \frac{\Phi_1}{B_1} = \frac{0,21 \cdot 10^6}{11\,500} = 18,3 \text{ см}^2,$$

где принято:

$$B_1 = 11\,500 \text{ гс.}$$

Размеры сечения главного стержня

$$a_1 = b_1 = \sqrt{\frac{S_1}{k_3}} = \sqrt{\frac{18,3}{0,9}} \approx 4,5 \text{ см,}$$

где принято:

$$k_3 = 0,9.$$

6. Число витков первичной обмотки

$$\dot{W}_1 = \frac{U_1 \cdot 10^8}{4,44 f \Phi_1} = \frac{120 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,21 \cdot 10^6} \approx 270.$$

7. Сечение и диаметр провода первичной обмотки и размещение ее на главных стержнях.

М. д. с. при холостом ходе, соответствующая участку вторичной магнитной цепи

$$\begin{aligned} AW_2 &\approx a w_2 l_2 + a w_{cp} a_1 + 0,8 B_{20} \delta_s = \\ &= 480 \cdot 0,9 + 89 \cdot 4,5 + 0,8 \cdot 20\,500 \cdot 0,0035 \approx 890, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} B_{20} &= \frac{\Phi_{20}}{S_2} = \frac{0,0082 \cdot 10^6}{0,40} = 20\,500 \text{ гс}; \quad B'_{20} = \frac{B_{20}}{2} \left(1 + \frac{b_2}{a_1}\right) = \\ &= \frac{20\,500}{2} \left(1 + \frac{1,3}{4,5}\right) = 13\,200 \text{ гс}; \end{aligned}$$

по кривым намагничивания рис. 41:

$$a w_2 = 480; \quad a w'_2 = 13 \text{ — для стали марки Э42;}$$

$$a w_{cp} \approx \frac{a w_2 + 4 a w'_2}{6} = \frac{480 + 4 \cdot 13}{6} \approx 89;$$

принято $\delta_s = 0,0035 \text{ см.}$

Действующее значение первичного тока

$$I_1 \approx \frac{(1,1 - 1,3) AW_2}{\sqrt{2} W_1} = \frac{1,2 \cdot 890}{\sqrt{2} \cdot 270} \approx 2,8 \text{ а.}$$

Предварительное значение поперечного сечения провода первичной обмотки

$$q'_1 = \frac{I_1}{j'_1} = \frac{2,8}{2,0} = 1,4 \text{ мм}^2,$$

где принято:

$$j'_1 = 2,0 \text{ а/мм}^2.$$

Окончательно по ГОСТ 6324-52 из приложения I принимаем:

$$q_1 = 1,43 \text{ мм}^2; \quad \frac{d_1}{d_{1н}} = \frac{1,35}{1,62} \text{ мм, марка провода ПБД.}$$

Длина, занимаемая первичной обмоткой по высоте главного стержня

$$l \approx (1,2 + 1,6) a_1 = 1,2 \cdot 4,5 = 5,4 \text{ см.}$$

Число витков первичной обмотки в одном слое

$$n_1 = \frac{l - 2\epsilon_1}{d_{1н}} = \frac{5,4 - 2 \cdot 0,2}{0,162} \approx 30,$$

где толщина щеки каркаса принята:

$$\epsilon_1 = 2 \text{ мм; электрокартон ЭВ (ГОСТ 2824-45).}$$

Число слоев первичной обмотки на стержне

$$m_1 = \frac{W_1}{2n_1} = \frac{270}{2 \cdot 30} \approx 5.$$

Толщина первичной обмотки

$$\delta_1 = m_1 d_{1н} = 5 \cdot 0,162 \approx 0,81 \text{ см.}$$

Ширина окна сердечника трансформатора в месте размещения первичной обмотки

$$b = 2(\epsilon'_0 + \delta_1) + \epsilon_3 = 2(0,15 + 0,81) + 0,4 \approx 2,3 \text{ см,}$$

где принято: $\epsilon_3 = 4 \text{ мм; } \epsilon'_0 = 1,5 \text{ мм; электрокартон ЭВ (ГОСТ 2824-45).}$

8. Число витков регулировочной обмотки. Примем амплитуду потока регулировочной обмотки:

$$\Phi_p = (0,6 - 0,7) \Phi_1 = 0,7 \cdot 0,21 \cdot 10^6 \approx 0,147 \cdot 10^6 \text{ мкс;}$$

тогда число витков этой обмотки будет:

$$W_p = W_1 = 270.$$

9. Сечение и диаметр провода регулировочной обмотки и размещение ее на главных стержнях. По табл. 8 для $\theta_m = 70^\circ$ примем:

$$A W_{pm} = 1,4 A W_2 = 1,4 \cdot 890 = 1240.$$

Наибольший ток регулировочной обмотки

$$I_{pm} = \frac{A W_{pm}}{\sqrt{2} W_p} = \frac{1240}{\sqrt{2} \cdot 270} = 3,26 \text{ а.}$$

Предварительное значение поперечного сечения провода регулировочной обмотки

$$q'_p = \frac{I_{pm}}{j'_{pm}} = \frac{3,26}{2,7} = 1,2 \text{ мм}^2,$$

где принято:

$$j'_{pm} = 2,7 \text{ а/мм}^2.$$

Окончательно по ГОСТ 2773-51 из приложения I принимаем:

$$q_p = 1,21 \text{ мм}^2; \quad \frac{d_p}{d_{pn}} = \frac{1,25}{1,33} \text{ мм, марка провода ПЭЛ.}$$

Число слоев регулировочной обмотки на стержне

$$m_p \approx \frac{\delta_1}{d_{pn}} = \frac{0,81}{0,133} = 6.$$

Число витков регулировочной обмотки в одном слое

$$n_p = \frac{W_p}{2m_p} = \frac{270}{2 \cdot 6} = 23.$$

Длина, занимаемая регулировочной обмоткой по высоте главного стержня

$$l_p = n_p d_{pn} + 2\varepsilon_1 = 23 \cdot 0,133 + 2 \cdot 0,15 = 3,3 \text{ см,}$$

где толщина щеки каркаса принята $\varepsilon_1 = 1,5 \text{ мм}$; электрокартон ЭВ (ГОСТ 2824-45).

Сечение торца окна трансформатора, занимаемого регулировочной обмоткой

$$S'' = b_1 l_p = 4,5 \cdot 3,3 = 15,0 \text{ см}^2.$$

10. Размеры магнитных шунтов. Общая сумма отношений поперечных сечений верхнего и нижнего магнитных шунтов к длинам воздушных зазоров между каждым из них и торцом окна трансформатора:

$$\begin{aligned} \frac{S'_s}{\delta'_s k'_s} + \frac{S''_s}{\delta''_s k''_s} &= \frac{1,6 (\Phi_1 - \Phi_{20})}{A W_2} - \frac{2S'}{k_2 l_2} - \frac{2S''}{k'_2 b} - \frac{2S'''}{k''' \delta'''} = \\ &= \frac{1,6 (0,21 \cdot 10^6 - 0,0082 \cdot 10^6)}{890} - \frac{2 \cdot 5,3}{0,93 \cdot 0,9} - \frac{2 \cdot 15}{0,85 \cdot 2,3} - \frac{2 \cdot 9}{0,95 \cdot 0,7} = 305 \text{ см,} \end{aligned}$$

где

$$S' = b_1 b' + (b_1 - b_2) a_2 = 4,5 \cdot 0,9 + (4,5 - 1,3) 0,35 = 5,3 \text{ см}^2;$$

$$b' = 0,9 \text{ см (рис. 25, б); } S''' = a_1 b_{y\Gamma} = 4,5 \cdot 2 = 9 \text{ см}^2 \text{ (рис. 32);}$$

по кривой рис. 30

$$k_2 = 0,93 \text{ при } l_2 = 0,9 \text{ см;}$$

$$k'_2 = 0,85 \text{ при } b = 2,3 \text{ см;}$$

$$k''' = 0,95 \text{ при } \delta''' \approx 0,8 l_2 = 0,8 \cdot 0,9 \approx 0,7 \text{ см.}$$

Положим:

$$\delta'_s = (0,02 \div 0,10) l_2 = 0,045 \cdot 0,9 \approx 0,04 \text{ см; } k'_s \approx 1;$$

$$\delta''_s = (0,05 \div 0,20) l_2 = 0,11 \cdot 0,9 \approx 0,10 \text{ см; } k''_s = 0,99.$$

Далее, по конструктивным соображениям примем поперечные сечения верхнего и нижнего шунтов одинаковыми, т. е. положим:

$$S'_s = S''_s;$$

тогда

$$S'_s \left(\frac{1}{\delta'_s k'_s} + \frac{1}{\delta''_s k''_s} \right) = 305 \quad \text{или} \quad S'_s \left(\frac{1}{0,04 \cdot 1} + \frac{1}{0,1 \cdot 0,99} \right) = 35,1 \cdot S'_s = 305,$$

откуда

$$S'_s = S''_s = \frac{305}{35,1} = 8,7 \text{ см}^2.$$

Толщина пакетов шунтов (рис. 25, б) будет:

$$b'_s = b''_s = \frac{S'_s}{k_3 b_1} = \frac{8,7}{0,9 \cdot 4,5} \approx 2,1 \text{ см.}$$

Полная высота окна сердечника трансформатора, занимаемая первичной и регулировочной обмотками и нижним шунтом

$$H = l_1 + b'_s + l_p = 5,4 + 2,1 + 3,3 = 10,8 \text{ см.}$$

Полная высота сердечника трансформатора

$$H' = H + b'_s + b' + a_2 = 10,8 + 2,1 + 0,9 + 0,35 = 14,2 \text{ см.}$$

Длина ярма трансформатора

$$l_3 = b + 2a_1 = 2,3 + 2 \cdot 4,5 = 11,3 \text{ см.}$$

11. Построение пиковой кривой вторичного напряжения во времени при холостом ходе. Для возможности графического построения пиковой кривой вторичного напряжения во времени в табл. 10 дан расчет кривых намагничивания рассчитываемого пикового трансформатора $\varphi_1 = f_1(AW_1)$ и $\varphi_2 = f_2(AW_1)$, построенных в удобных масштабах на рис. 31. На этом же рисунке построена кривая во времени первичного потока $\varphi_1 = \Phi_1 \sin \omega t$, а с помощью последней и кривых намагничивания φ_1 и φ_2 — кривая $\varphi_2 = f(\omega t)$ (кривая 2' на рис. 31). Далее производится графическое дифференцирование кривой 2' описанным выше способом, в результате которого получается искомая кривая 3 вторичной э. д. с. $e_2 = f(\omega t)$ без учета знака производной.

Масштаб ординат кривой э. д. с. $e_2 = f(\omega t)$ будет:

$$1 \text{ мм} = 2\pi f W_2 q_2' \cdot 10^{-8} = 2\pi \cdot 50 \cdot 170 \cdot 0,0006 \cdot 10^6 \cdot 10^{-8} = 0,321 \text{ в};$$

амплитуда э. д. с. при холостом ходе

$$U_{mo} = 0,321 \cdot 190 \text{ мм} \approx 61 \text{ в.}$$

Кривые намагничивания расцеты

B_2	$B'_2 = 0,64B_2$	$\frac{aw_2 + 4aw'_2}{6}$	$AW_2 = 0,9aw_2 + 4,5aw_{cp} + 0,0028B_2$	$B' = \frac{AW_2}{0,67}$	$B'_s = \frac{AW_2}{0,064}$	$B'' = \frac{AW_2}{1,56}$	$B''' = \frac{AW_2}{0,158}$	$B''' = \frac{AW_2}{0,85}$
5 150	3 300	0,4	16	24	250	10	100	19
10 250	6 600	1,2	37	55	578	24	234	43
15 350	9 900	9	123	184	1 920	79	780	144
18 000	11 600	38	410	612	6 400	263	2600	482
20 500	13 200	89	890	1330	13 900	570	5630	1045
21 000	13 500	98	976	1455	15 250	625	6180	1150

12. Средние длины витков обмоток трансформатора.

Вторичная обмотка

$$l_{w2} = 2(a_2 + b_2 + 4\varepsilon''_0 + 2\delta_2) = 2(0,35 + 1,3 + 4 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,27) = 5,2 \text{ см};$$

первичная и регулировочная обмотки

$$l_{w1} = l_{wp} = 2(a_1 + b_1 + 4\varepsilon'_0 + 2\delta_1) = 2(4,5 + 4,5 + 4 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,81) = 22,4 \text{ см},$$

где принято: $\varepsilon'_0 = 1,5 \text{ мм}$; $\varepsilon''_0 = 1,0 \text{ мм}$; электрокартон ЭВ (ГОСТ 2824-45).

13. Вес меди и активные сопротивления обмоток.

Вес меди вторичной обмотки

$$G_{m2} = 8,9 W'_2 q_2 l_{w2} \cdot 10^{-5} = 8,9 \cdot 170 \cdot 0,044 \cdot 5,2 \cdot 10^{-5} = 0,0035 \text{ кг};$$

вес меди первичной обмотки

$$G_{m1} = 8,9 W_1 q_1 l_{w1} \cdot 10^{-5} = 8,9 \cdot 270 \cdot 1,43 \cdot 22,4 \cdot 10^{-5} = 0,770 \text{ кг};$$

ваемого пикового трансформатора

$B_1 = \frac{0,4B_2 + 5,3B' + 8,7B'_s}{18,3} + \frac{15B'' + 8,7B'_s + 18B'''}{18,3}$	$AW'_1 = 22,1aw_1 + 0,0056B_1$	$AW_1 = AW'_1 + AW_2$	$\varphi_2 = 0,4B_2$	$\varphi_1 = 18,3B_1$	$t_1 = \frac{AW_1}{270}$
310	4	20	$0,0020 \cdot 10^6$	$0,00565 \cdot 10^6$	0,074
680	8	45	$0,0040 \cdot 10^6$	$0,0124 \cdot 10^6$	0,167
1 850	14	137	$0,0061 \cdot 10^6$	$0,0338 \cdot 10^6$	0,507
5 460	48	458	$0,0072 \cdot 10^6$	$0,100 \cdot 10^6$	1,70
11 400	157	1047	$0,0082 \cdot 10^6$	$0,209 \cdot 10^6$	3,90
12 500	231	1207	$0,0084 \cdot 10^6$	$0,228 \cdot 10^6$	4,45

вес меди регулировочной обмотки

$$G_{mp} = 8,9 W_p q_p l_{wp} \cdot 10^{-5} = 8,9 \cdot 270 \cdot 1,21 \cdot 22,4 \cdot 10^{-5} = 0,650 \text{ кг};$$

общий вес меди обмоток

$$G_m = G_{m1} + G_{m2} + G_{mp} = 0,770 + 0,0035 + 0,650 \approx 1,423 \text{ кг}.$$

Активные сопротивления обмоток трансформатора при 75° С:

$$r_1 = 1,22 \frac{W_1 l_{w1}}{5700 q_1} = 1,22 \frac{270 \cdot 22,4}{5700 \cdot 1,43} = 0,905 \text{ ом};$$

$$r_2 = 1,22 \frac{W'_2 l_{w2}}{5700 q_2} = 1,22 \frac{170 \cdot 5,2}{5700 \cdot 0,044} = 4,3 \text{ ом};$$

$$r_p = 1,22 \frac{W_p l_{wp}}{5700 q_p} = 1,22 \frac{270 \cdot 22,4}{5700 \cdot 1,21} = 1,07 \text{ ом}.$$

14. Потери в меди обмоток при 75° С:

$$P_{m1} = I_1^2 r_1 = 2,8^2 \cdot 0,905 \approx 7,1 \text{ Вт};$$

$$P_{м2} = I_2^2 r_2 = 0,10^2 \cdot 4,3 = 0,043 \text{ вт};$$

$$P_{мр} = I_{рм}^2 r_p = 3,26^2 \cdot 1,07 = 11,4 \text{ вт}.$$

15. Вес стали сердечника трансформатора.

Вес стали вторичного стержня

$$G_{с2} = 7,8 S_2 l_2 \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot 0,4 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3} = 0,0028 \text{ кг};$$

вес стали первичных стержней

$$\begin{aligned} G_{с1} &= 2 \cdot 7,8 (l_1 + l_p + b_s'') S_1 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 7,8 (b_s' + b' + a_2) S_1' \cdot 10^{-3} = \\ &= 2 \cdot 7,8 (5,4 + 3,3 + 2,1) 18,3 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 7,8 (2,1 + \\ &\quad + 0,9 + 0,35) 36,5 \cdot 10^{-3} = 5,0 \text{ кг}, \end{aligned}$$

где

$$S_1' = k_3 b_1 (l_3 - b) = 0,9 \cdot 4,5 (11,3 - 2,3) = 36,5 \text{ см}^2;$$

вес стали ярма

$$G_{сЯ} = 7,8 S_1 l_3 \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot 18,3 \cdot 11,3 \cdot 10^{-3} = 1,6 \text{ кг};$$

вес стали магнитных шунтов

$$G_{сs}' = 7,8 (l_2 - 2\delta_s') S_s' \cdot 10^{-3} = 7,8 (0,9 - 2 \cdot 0,04) 8,7 \cdot 10^{-3} = 0,056 \text{ кг};$$

$$G_{сs}'' = 7,8 (b - 2\delta_s'') S_s'' \cdot 10^{-3} = 7,8 (2,3 - 2 \cdot 0,1) 8,7 \cdot 10^{-3} = 0,141 \text{ кг};$$

общий вес стали сердечника трансформатора

$$\begin{aligned} G_c &= G_{с1} + G_{с2} + G_{сЯ} + G_{сs}' + G_{сs}'' = \\ &= 5,0 + 0,0028 + 1,6 + 0,056 + 0,141 = 6,8 \text{ кг}. \end{aligned}$$

16. Потери в стали сердечника.

Потери в стали вторичного стержня

$$P_{с2} = k_c \left(\frac{B_2}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G_{с2} = 1,2 \left(\frac{19\,500}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} 0,0028 = 0,013 \text{ вт};$$

потери в стали части первичных стержней, охватываемой первичной обмоткой, и ярма

$$\begin{aligned} P_{с1}' &= k_c \left(\frac{B_1}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} (G_{с1}' + G_{сЯ}) = \\ &= 1,2 \left(\frac{11\,500}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} (1,54 + 1,6) = 5,0 \text{ вт}; \end{aligned}$$

потери в стали остальной части первичных стержней

$$P_{с1}'' \approx k_c \left(\frac{B_1'}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G_{с1}'' = 1,2 \left(\frac{5\,750}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} 3,46 \approx 1,4 \text{ вт};$$

потери в стали магнитных шунтов

$$P'_{cs} = k_c \left(\frac{B'_s}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G'_{cs} = 1,2 \left(\frac{13\,900}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} 0,056 = 0,13 \text{ вт},$$

$$P''_{cs} = k_c \left(\frac{B''_s}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G''_{cs} = 1,2 \left(\frac{5630}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} 0,141 = 0,052 \text{ вт},$$

где

$$G'_{c1} = 2 \cdot 7,8 S_1 l_1 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 7,8 \cdot 18,3 \cdot 5,4 \cdot 10^{-3} = 1,54 \text{ кг};$$

$$G''_{c1} = G_{c1} - G'_{c1} = 5,0 - 1,54 = 3,46 \text{ кг};$$

$$B'_1 \approx \frac{B_1}{2} = \frac{11\,500}{2} = 5750 \text{ гс};$$

$$B'_s \approx \frac{A W_2}{1,68' k_s} = \frac{890}{1,6 \cdot 0,04 \cdot 1} = 13\,900 \text{ гс};$$

$$B''_s \approx \frac{A W_2}{1,68'' k_s} = \frac{890}{1,6 \cdot 0,1 \cdot 0,99} = 5630 \text{ гс};$$

$$k_c = 1,2 \text{ вт/кг} \text{— для стали марки Э42};$$

общие потери в стали сердечника трансформатора

$$\begin{aligned} P_c &= P_{c2} + P'_{c1} + P''_{c1} + P'_{cs} + P''_{cs} = \\ &= 0,013 + 5,0 + 1,4 + 0,13 + 0,052 \approx 6,6 \text{ вт}. \end{aligned}$$

17. Ток холостого хода трансформатора.

Активная составляющая тока холостого хода

$$I_{oa} = \frac{P_c}{U_1} = \frac{6,6}{120} = 0,055 \text{ а};$$

реактивная составляющая тока

$$I_{or} = \frac{A W_1}{\sqrt{2} \cdot W_1} = \frac{1047}{\sqrt{2} \cdot 270} = 2,75 \text{ а};$$

ток холостого хода

$$I_0 = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{or}^2} = \sqrt{0,055^2 + 2,75^2} \approx 2,8 \text{ а}.$$

Первичный ток трансформатора практически

$$I_1 \approx I_0 = 2,8 \text{ а},$$

где $A W_1 = 1047$ —из табл. 10.

18. Проверка трансформатора на нагревание.

Открытые поверхности охлаждения сердечника и обмоток трансформатора:

$$\begin{aligned}
 S_{\text{сер}} &\approx 2(a_1 + b_s'' + b_s' + b' + \alpha_2 + l_3)b_1 - l_2b_1 = \\
 &= 2(4,5 + 2,1 + 2,1 + 0,9 + 0,35 + 11,3)4,5 - 0,9 \cdot 4,5 \approx 92 \text{ см}^2; \\
 S_{\text{обм}} &\approx 4(a_1 + b_1 + 4s_0' + 4\delta_1)(l_1 + l_p) = \\
 &= 4(4,5 + 4,5 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,81)(5,4 + 3,3) = 445 \text{ см}^2.
 \end{aligned}$$

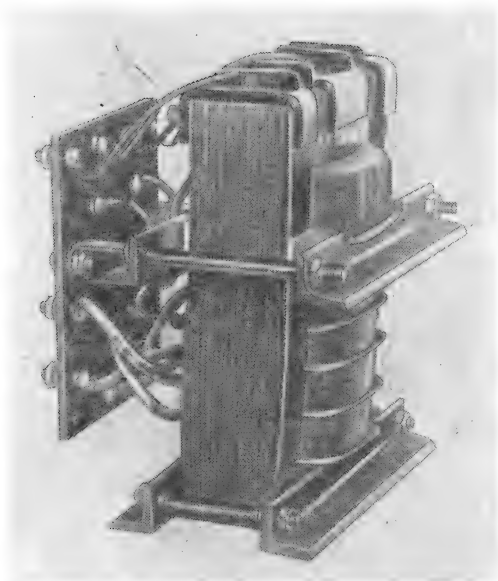


Рис. 32. Пиковый трансформатор

Превышение температуры сердечника и обмоток трансформатора над окружающей средой:

$$\theta = \frac{P_{\text{м1}} + P_{\text{мр}} + P_{\text{с}}}{\alpha_0 (S_{\text{сер}} + S_{\text{обм}})} + \Delta\theta^{\sigma} = \frac{7,1 + 11,4 + 6,6}{14 \cdot 10^{-4} (92 + 445)} + 10 \approx 44^{\circ} \text{С},$$

что вполне допустимо.

Общий вид регулируемого пикового трансформатора представлен на рис. 32.

ИМПУЛЬСНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Под импульсным трансформатором понимается специальный тип трансформатора, который служит для трансформации кратковременных импульсов напряжения приблизительно прямоугольной формы длительностью порядка нескольких микросекунд и менее, периодически повторяющихся с частотой примерно 500—2000 гц или более. В некоторых случаях частота следования импульсов может быть значительно выше указанной. Эти трансформаторы находят широкое применение в технике радиолокации, телевидения и импульсной радиосвязи. При помощи их в этих областях техники осуществляется: повышение амплитуды импульса напряжения, согласование полных сопротивлений источника напряжения и нагрузки, изменение полярности импульсов и межкаскадная связь в усилителях.

Импульсные трансформаторы должны удовлетворять требованию возможно меньшего искажения передачи формы трансформируемых импульсов напряжения. Искажение формы этих импульсов обуславливается возникновением в трансформаторах паразитных переходных процессов вследствие наличия в них емкостей и индуктивностей рассеяния обмоток. Эти параметры обмоток являются значительным препятствием прохождению через трансформатор очень коротких импульсов напряжения.

Для уменьшения искажения формы трансформируемых импульсов напряжения необходимо при проектировании импульсных трансформаторов стремиться к возможно большему уменьшению указанных параметров их обмоток путем применения сердечников из специальных магнитных сплавов и использования обмоток надлежащей конструкции. При этом большое значение имеет уменьшение размеров сердечника и числа витков обмоток.

Для анализа переходных процессов в импульсных трансформаторах обычно пользуются схемой замещения трансфор-

матора, учитывающей как индуктивности, так и паразитные емкости обмоток (рис. 33). В этой схеме означают:

e_n —э. д. с. источника питания;

R_n —активное сопротивление источника питания;

C_1 —суммарная емкость первичной обмотки трансформатора и источника питания;

r_1 —активное сопротивление первичной обмотки;

L_s —индуктивность рассеяния обмоток;

L_1 —индуктивность намагничивания трансформатора;

C'_2 —суммарная емкость вторичной обмотки и нагрузки, приведенная к числу витков первичной;

r'_2 —активное сопротивление вторичной обмотки, приведенное к числу витков первичной;

R'_n —активное сопротивление нагрузки, приведенное к числу витков первичной обмотки трансформатора.

Так как анализ процессов в схеме рис. 33 получается затруднительным, то эту схему без большой погрешности можно упростить, учитывая, что $L_1 \approx \infty$ по сравнению с L_s и $C_2 \gg C_1$. Тогда, при применении прямоугольного импульса напряжения к первичной обмотке и учете влияния вихревых токов сердечника в виде сопротивления $r_{вх}$, упрощенная схема замещения импульсного трансформатора примет вид рис. 34. В этой схеме

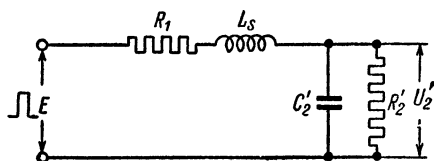


Рис. 34. Упрощенная схема замещения импульсного трансформатора

$$R_1 = R_n + r_1; \quad R'_2 = \frac{r_{вх} (R'_n + r'_2)}{r_{вх} + R'_n + r'_2}.$$

Далее, обозначим [Л. 5]:

$$1 + \frac{R_1}{R'_2} = 1 + \gamma_R; \quad z_\tau = \sqrt{\frac{L_s}{C'_2}}; \quad U'_2 = \frac{E}{1 + \gamma_R}, \quad (10)$$

где

z_T — волновое сопротивление трансформатора;

$T_1 = \sqrt{\frac{L_s C_2'}{1 + \gamma_R}}$ — паразитная постоянная времени трансформатора; параметр, определяющий характер переходного процесса в трансформаторе:

$$\rho = \frac{1}{2\sqrt{1 + \gamma_R}} \left(\frac{z_T}{R_2'} + \gamma_R \frac{R_2'}{z_T} \right). \quad (11)$$

Как показывает решение дифференциальных уравнений переходных процессов в импульсном трансформаторе по схеме рис. 34, при приложении к первичной обмотке его прямоугольного импульса напряжения относительная величина трансформируемого вторичного напряжения будет [Л. 5]:

а) при колебательном процессе в обмотках ($\rho < 1$)

$$\frac{u_2'}{U_2'} = 1 - \frac{e^{-\rho \frac{t}{T_1}}}{\nu} \sin(\nu t + \varphi), \quad (12)$$

где

$$\nu = \sqrt{1 - \rho^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\rho}{\sqrt{1 - \rho^2}}; \quad (12a)$$

б) при апериодическом процессе в обмотках ($\rho > 1$)

$$\frac{u_2'}{U_2'} = 1 + \alpha_1 e^{-s_1 \frac{t}{T_1}} - \alpha_2 e^{-s_2 \frac{t}{T_1}}, \quad (13)$$

где

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= \rho - \sqrt{\rho^2 - 1}; \quad s_2 = \rho + \sqrt{\rho^2 - 1}; \\ \alpha_1 &= \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 - 1}} - 1 \right); \quad \alpha_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 - 1}} + 1 \right). \end{aligned} \right\} \quad (13a)$$

При данном значении параметра ρ паразитная постоянная времени T_1 определяет длительность фронта трансформируемого импульса напряжения. Поэтому эта постоянная времени должна быть возможно малой по сравнению с длительностью импульса τ_n , чтобы искажение последнего было минимальным. Если фронт импульса составляет величину τ_Φ , то паразитная постоянная должна быть $T_1 \leq \frac{1}{3} \tau_\Phi$. Например, при $\tau_n = 1$ мксек и $\tau_\Phi = 0,1 \tau_n$ паразитная постоянная будет составлять

$$T_1 \leq \frac{1}{3} \tau_\Phi \approx 0,03 \text{ мксек.}$$

$$u_1 = -e_1 = W_1 S_c \frac{dB_c}{dt} \cdot 10^{-2} = \text{const};$$

следовательно, индукция в сердечнике $B_c = f(t)$ должна нарастать во времени по линейному закону (рис. 35).

$$u_1 = -e_1 = W_1 S_c \frac{dB_c}{dt} \cdot 10^{-2} = \text{const};$$

следовательно, индукция в сердечнике $B_c = f(t)$ должна нарастать во времени по линейному закону (рис. 35).

Приращение индукции в сердечнике будет:

$$\Delta B_{ct} = \frac{10^2}{W_1 S_c} \int_0^t u_1 dt = \frac{U_1 \cdot 10^2 t}{W_1 S_c}, \quad (14)$$

где

W_1 —число витков первичной обмотки;

S_c —поперечное сечение стержня сердечника, $см^2$;

U_1 —амплитуда импульса первичного напряжения, в;

t —время, *мксек.*

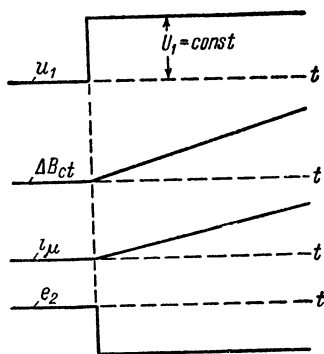


Рис. 35. Переходные процессы в импульсном трансформаторе

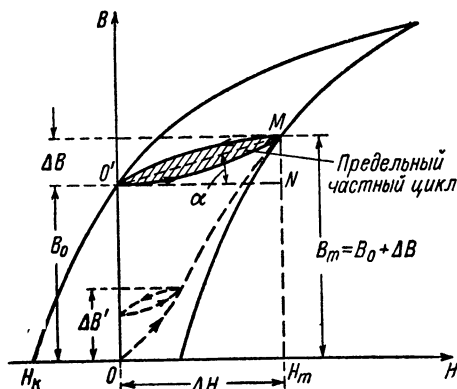


Рис. 36. Процесс намагничивания импульсного трансформатора

При линейном нарастании во времени индукции в сердечнике намагничивающий ток импульсного трансформатора i_{μ} за время длительности импульса напряжения также нарастает по линейному закону (рис. 35).

К моменту окончания действия импульса напряжения $t = \tau_n$ приращение индукции в сердечнике, согласно уравнению (14), достигнет вполне определенной величины:

$$\Delta B_c = \frac{U_1 \cdot 10^{2\tau_H}}{W_1 S_c} [zc]. \quad (15)$$

При периодическом намагничивании сердечника импульсного трансформатора в нем имеет место явление гистерезиса,

характеризуемое определенной петлей с остаточной индукцией B_0 и коэрцитивной силой H_k . В этом случае при периодически повторяющихся с определенной частотой прямоугольных импульсах напряжения длительностью τ_n мксек процесс намагничивания сердечника трансформатора будет протекать по ряду частных циклов, пока не достигнет предельного частного цикла петли гистерезиса (рис. 36).

Предельная петля частного цикла (рис. 36) определяет магнитную проницаемость μ_Δ на этом цикле:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{MN}{O'N} = k' \frac{\Delta B}{\Delta H} = k' \mu_\Delta, \quad (16)$$

где k' — масштабный коэффициент.

Для импульсного режима работы трансформатора наиболее подходящими являются такие магнитные материалы, которые обладают низкой величиной остаточной индукции B_0 и высоким значением индукции насыщения B_m (рис. 36). Это позволяет тогда получать достаточно высокие приращения индукции в сердечниках трансформаторов $\Delta B_{\max} = B_m - B_0$.

II. РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Исходными данными для расчета импульсного трансформатора являются следующие величины:

мощность в импульсе P_2 [вт] или [квт];

напряжения в импульсе U_1 и U_2 [в];

сопротивление нагрузки R_n [ом];

сопротивление источника $R_{\text{и}}$ [ом];

длительность импульса τ_n [мксек];

частота следования импульсов f_n [гц];

коэффициент искажения плоской части импульса λ .

Под коэффициентом искажения плоской части импульса понимается относительная величина понижения напряжения этой части к моменту окончания импульса:

$$\lambda = \frac{\Delta U}{U} = \frac{I_{k\mu}}{I_2} = 0,03 - 0,08,$$

где

I_2 — приведенный к первичной обмотке ток нагрузки;

$I_{k\mu}$ — ток кажущегося намагничивания, представляющий собой сумму действительного намагничивающего тока и составляющей, компенсирующей влияние размагничивающего действия вихревых токов в сердечнике трансформатора.

Нагрузкой импульсного трансформатора обычно является нелинейное сопротивление, имеющее приблизительно активный характер, как, например: магнетронный генератор, ламповый генератор, цепь сетки генераторной лампы или в некоторых

случаях чисто активное сопротивление. Нелинейный характер сопротивления нагрузки за время действия импульса напряжения сравнительно мало влияет на переходные процессы в трансформаторе, поэтому данное сопротивление практически можно принимать активным, равным некоторому постоянному среднему значению R_n . Ввиду такого характера нагрузки отдаваемая импульсным трансформатором мощность обычно измеряется в ваттах или киловаттах.

1. Определение средней мощности и токов трансформатора

В маломощных импульсных трансформаторах отдаваемая вторичной обмоткой мощность в импульсе находится в диапазоне от нескольких десятков ватт до нескольких сотен киловатт, что соответствует средней мощности трансформатора за период посылки импульса в пределах порядка от единиц до нескольких сотен ватт. Такое соотношение между средней и импульсной мощностями трансформатора обуславливается тем, что длительность импульса τ_n измеряется микросекундами, а период посылки его T_n — миллисекундами, так что отношение между ними составляет величину порядка 10^{-3} .

Напряжения маломощных импульсных трансформаторов указанного диапазона мощностей обычно находятся в следующих пределах:

низшее напряжение — $100 \div 2500$ в;

высшее " — $300 \div 12500$ в.

Средняя отдаваемая мощность импульсного трансформатора может быть определена следующим образом:

$$P_{cp} = \frac{1}{T_n} \int_0^{\tau_n} P_2 dt = P_2 \frac{\tau_n}{T_n} = f_n \tau_n P_2,$$

где

$P_2 = U_2 I_2 = \frac{U_2^2}{R_n}$ — мощность вторичной обмотки в импульсе по заданию, вт;

$f_n = \frac{1}{T_n}$ — частота следования импульсов по заданию, гц;

τ_n — длительность импульса по заданию, сек.

Токи первичной и вторичной обмоток в импульсе будут:

$$I_1 = \frac{P_2}{U_1} [a]; \quad I_2 = \frac{P_2}{U_2} [a].$$

Эффективные или действующие значения токов первичной и вторичной обмоток импульсного трансформатора определяются из условия, что потери в меди этих обмоток при прохождении через них коротких прямоугольных импульсов тока

обуславливаются не только омическими сопротивлениями обмоток, но также явлением поверхностного эффекта в проводах и влиянием токов наводки в них. С учетом этих явлений действующие значения первичного и вторичного токов импульсного трансформатора можно представить так [Л. 7]:

$$I_{1\text{эф}} = I_1 \sqrt{f_n \tau_n k_n k_{n1}} [a],$$

$$I_{2\text{эф}} = I_2 \sqrt{f_n \tau_n k_n k_{n2}} [a],$$

где

f_n —частота следования импульсов по заданию, гц ;

τ_n —длительность импульса по заданию, сек.;

$k_n = 2,4 \div 2,8$ —коэффициент, учитывающий ток наводки в проводах обмоток при прямоугольном импульсе токов;

k_{n1} и k_{n2} —коэффициенты поверхностного эффекта в голых медных проводах круглого сечения, которые предположительно можно принять в следующих пределах:

для обмотки низшего напряжения— $k_{n1} = 1,2 \div 1,6$;

„ „ высшего „ — $k_{n2} = 1,1 \div 1,4$.

В ряде случаев через вторичную обмотку импульсных трансформаторов проходит как импульсный ток, так и ток накала. Действующее значение суммы токов импульса и накала во вторичной обмотке в этом случае можно определить с помощью уравнения

$$I_{\text{эф}} = \sqrt{I_{2\text{эф}}^2 + I_{\text{н эф}}^2} [a].$$

2. Типы импульсных трансформаторов

По конструкции сердечников импульсные трансформаторы, как и обычные маломощные силовые трансформаторы, могут быть стержневого и броневые типов. Однако маломощные импульсные трансформаторы, применяемые, например, для блокинг-генераторов или в качестве межкаскадных трансформаторов в усилителях и других случаях, в большинстве своем выполняются стержневого типа.

Материалом для сердечников импульсных трансформаторов обычно служит листовая электротехническая сталь марки Э44 (старые марки ВЧ-1 и ВЧ-2) и холоднокатанная сталь марок Э310 и Э340 (старая марка ХВП) толщиной листа 0,10—0,20 мм (ГОСТ 802-54). Применяются также специальные магнитные сплавы той же или меньшей толщины, как, например, пермаллой разных марок и др. Эти материалы выпускаются как в листах, так и в виде ленты. Они обладают повышенными магнитными качествами в направлении прокатки, поэтому сердеч-

ники импульсных трансформаторов часто изготавливаются из длинной ленты навитого типа по пути магнитного потока.

В качестве изоляции между листами сердечника трансформатора служит порошкообразная окись кремния или магния и оксидная изоляция. Ввиду малой толщины листов коэффициент заполнения поперечного сечения сердечника сталью в импульсных трансформаторах несколько меньше, чем в обычных, и составляет $k_3 = 0,80 \div 0,90$.

В последнее время в некоторых случаях для сердечников маломощных импульсных трансформаторов, предназначенных для преобразования импульсов длительностью менее одной микросекунды при больших частотах их следования, встречается применение нового магнитного материала, называемого ферритом. По своим магнитным свойствам ферриты относятся к низкокоэрцитивным магнитным материалам, занимающим промежуточное положение между указанными выше металлическими магнитными материалами и магнитодиэлектриками. Благодаря высокому удельному электросопротивлению ферритов потери на вихревые токи в них в переменных полях при больших частотах получаются небольшими.

Ферриты имеют мелкозернистую структуру, обладают значительной твердостью и поэтому плохо обрабатываются обычным режущим инструментом. Их обработка возможна только путем шлифовки деталей из них с помощью абразивов.

Технология изготовления ферритов аналогична технологии производства керамики. Детали прессуются из смеси окислов при давлении $1\text{--}3\text{ т/см}^2$; реакция образования ферритов происходит в опрессованных деталях при температуре $1100\text{--}1400^\circ\text{С}$. При этом в процессе спекания деталей имеет место усадка их в пределах $10\text{--}20\%$. В связи с этим применение данного материала для сердечников маломощных импульсных трансформаторов может быть целесообразным только при частотах следования импульсов порядка нескольких десятков килогерц. Так, например, имеется миниатюрный импульсный трансформатор, предназначенный для передачи импульсов длительностью менее $0,1\text{ мксек}$, состоящий из двух ферритовых колец с намотанными на них несколькими витками провода [Л. 8].

Обмотки маломощных импульсных трансформаторов выполняются обычно одно- или двухслойными цилиндрического типа, в целях уменьшения индуктивности рассеяния.

Различные типы сердечников маломощных импульсных трансформаторов стержневого типа представлены на рис. 37.

Импульсные трансформаторы на рабочие напряжения до 6 кВ обычно выполняются с воздушным охлаждением, а при напряжениях свыше 6 кВ , по условиям изоляции обмоток, они делаются с масляным охлаждением.

Особенностью конструкции маломощных импульсных трансформаторов является компактность их сердечника и обмоток

для обеспечения возможно меньших значений индуктивности рассеяния и распределенной емкости этих трансформаторов. В связи с этим при очень малых мощностях в импульсе для этой цели нередко приходится применять неразрезные тороидальные сердечники.

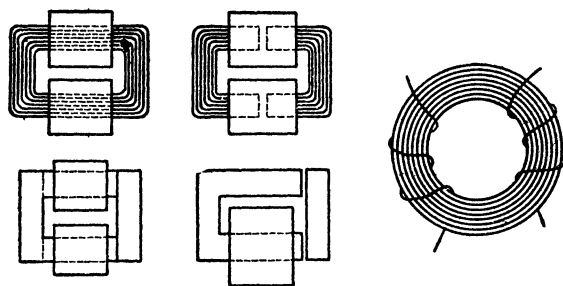


Рис. 37. Типы сердечников импульсных трансформаторов

3. Выбор приращения индукции и толщины листов материала сердечника

Задаются величиной приращения индукции ΔB_c за импульс в зависимости от мощности в импульсе и по магнитным характеристикам материала сердечника (рис. 38) находят проницаемость μ_Δ по соотноше-

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta B_c}{\Delta H}.$$

Выбор ΔB_c предварительно производится по табл. 11.

Далее выбирается толщина листов сердечника из условия $\tau_n = (2 \div 3) \tau_{вх}$, при этом постоянная времени контуров вихревых токов в сердечнике определяется уравнением [Л. 5]

$$T_{вх} \approx 0,2 \frac{\mu_\Delta \delta_c^2}{1000 \rho_c} [\text{мксек}],$$

где

δ_c — толщина листа сердечника, см;

ρ_c — удельное электрическое сопротивление материала сердечника, $\text{ом} \cdot \text{см}^2 / \text{см}$.

Так, например, для холоднокатанной стали марок Э310 и Э340 (старая марка ХВП)

$$\rho_c = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ ом} \cdot \text{см}^2 / \text{см}.$$

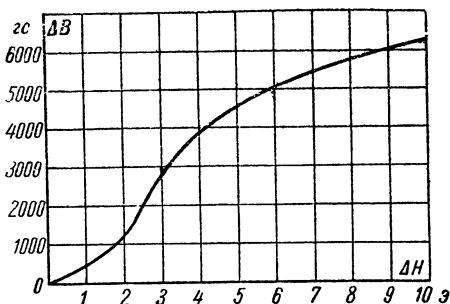


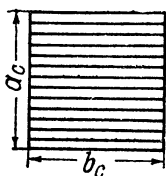
Рис. 38. Кривая намагничивания на частном цикле стали марок Э310 и Э44

Таблица 11

Приращение индукции ΔB_c гс	Мощность в импульсе P_2 квт
100—500	до 0,005
500—1000	0,005—0,05
1000—3000	0,05—50
3000—5000	50—500

4. Определение поперечного сечения стержня и средней длины магнитопровода сердечника трансформатора

Соотношение между поперечным сечением стержня сердечника импульсного трансформатора S_c и средней длиной магнитопровода его l представляется в следующем виде [Л. 5]:



$$\frac{0,8\Delta B_c^2 S_c l \cdot 10^{-2}}{\mu_\Delta \tau_n} = \lambda U_1 I_2' = \lambda P_2,$$

откуда объем сердечника трансформатора будет:

$$S_c l = \frac{100\mu_\Delta \tau_n \lambda P_2}{0,8\Delta B_c^2} \text{ [см}^3\text{]}.$$

Рис. 39. Форма поперечного сечения стержня импульсного трансформатора

Так как размеры сердечника импульсного трансформатора должны быть возможно минимальными, причем средняя длина магнитопровода его l близка к средней длине витка обмоток l_w , то отношение поперечного сечения стержня S_c к длине магнитопровода l в маломощных трансформаторах стержневого типа обычно находится в следующих пределах:

$$\psi = \frac{S_c}{l} = (0,18 \div 0,32) \text{ [см]},$$

хотя в отдельных случаях встречаются отступления от указанных значений ψ в меньшую или большую стороны.

После этого поперечное сечение стержня будет:

$$S_c = \frac{10}{\Delta B_c} \sqrt{\frac{\mu_\Delta \tau_n \lambda \psi P_2}{0,8}} \text{ [см}^2\text{]}$$

и средняя длина магнитопровода сердечника:

$$l = \frac{S_c}{\psi} \text{ [см]},$$

где P_2 —мощность трансформатора в импульсе (вт) по заданию, λ и τ_n берутся из задания, ΔB_c и μ_Δ —из позиции 3.

Поперечные сечения стержней и ярем импульсного трансформатора выполняются одинаковыми и прямоугольной формы (рис. 39), при этом отношение $\zeta = \frac{b_c}{a_c} = 1,0 \div 2,2$.

Размеры поперечного сечения стержней и ярем сердечника трансформатора будут:

$$a_c = \sqrt{\frac{S_c}{k_3 \zeta}} [см],$$

$$b_c = \zeta a_c [см],$$

где $k_3 = 0,8 \div 0,9$ —коэффициент заполнения сталью сечения стержня.

5. Определение числа витков обмоток трансформатора

Число витков первичной и вторичной обмоток импульсного трансформатора определяется по формуле (15):

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot 10^3 \tau_n}{\Delta B_c S_c};$$

$$W_2 = W_1 \frac{U_2}{U_1};$$

при этом число вольт, приходящихся на один виток, будет:

$$e_w = \frac{U_1}{W_1} [в/виток],$$

где τ_n —длительность импульса (мксек) по заданию, U_1 и U_2 берутся из задания, ΔB_c —из позиции 3, S_c —из позиции 4.

6. Определение сечения и диаметра проводов обмоток

В маломощных импульсных трансформаторах при мощностях в импульсе менее киловатта средние потери в меди обмоток, даже при малом диаметре провода, ничтожно малы в отношении допустимого нагрева. Поэтому поперечное сечение проводов обмоток в этом случае выбирается из соображений легкости намотки, размеров окна в сердечнике и получения возможно малого сопротивления обмотки по сравнению с сопротивлением нагрузки.

При мощностях в импульсе более киловатта поперечное сечение проводов обмоток выбирается по допустимой плотности тока.

Предварительные значения поперечных сечений проводов первичной и вторичной обмоток:

$$q'_1 = \frac{I_{1эф}}{I'_1} [мм^2], \quad q'_2 = \frac{I_{2эф}}{I'_2} [мм^2],$$

где $I_{1эф}$ и $I_{2эф}$ берутся из позиции 1 главы четвертой.

Окончательные значения сечений и диаметров этих проводов выбираются по ближайшим данным ГОСТ из приложения I:

$$q_1 = \dots \text{ мм}^2; \frac{d_1}{d_{1н}} = \dots \text{ мм}; q_2 = \dots, \text{ мм}^2; \frac{d_2}{d_{2н}} = \dots \text{ мм}.$$

В маломощных импульсных трансформаторах наибольшая плотность тока в проводах обмоток по условиям допустимого нагрева может быть принята в следующих пределах:

$j = 2 \div 3 \text{ а/мм}^2$ —при естественном воздушном охлаждении,

$j = 4 \div 7 \text{ а/мм}^2$ —при естественном масляном охлаждении.

В некоторых случаях по условиям укладки проводов на стержне приходится отступать в сторону меньших значений плотностей тока, чем указанные.

7. Укладка обмоток и уточнение размеров окна сердечника трансформатора

Для получения возможно малой индуктивности рассеяния и уменьшения распределенной емкости между обмотками импульсного трансформатора, эти обмотки следует выполнять по возможности однослойными или малослойными. В маломощных трансформаторах этого типа при мощностях в импульсе до нескольких сотен киловатт обмотки удается обычно выполнять однослойными и реже двухслойными.

При однослойном выполнении первичной обмотки и размещении ее на двух стержнях сердечника трансформатора длина, занимаемая ею по высоте стержня (рис. 40), будет:

Рис. 40. Основные размеры импульсного трансформатора

$$l_1 = \frac{W_1}{2} d_{1н} [\text{см}],$$

где W_1 берется из позиции 5, $d_{1н}$ —из позиции 6.

При размещении обмоток на одном стержне

$$l_1 = W_1 d_{1н} [\text{см}].$$

Высота окна сердечника трансформатора

$$H = l_1 + 2\varepsilon_1 [\text{см}],$$

где ε_1 —расстояние от обмотки до ярма (см), определяемое высшим напряжением обмоток (табл. 12).

Толщина первичной обмотки

Таблица 12

$$\delta_1 = d_{1н} \text{ [см]}.$$

Число витков вторичной обмотки
в одном слое

$$n_2 = \frac{l_1}{d_{2н}},$$

Высшее напря- жение кВ	Расстояние от обмотки до ярма ϵ_1 , см
До 0,5	0,1—0,2
0,5—2,0	0,2—0,6
3,0—6,0	0,8—1,2
Свыше 6,0 до 12,0	1,4—1,8

где $d_{2н}$ берется из позиции 6.

Число слоев вторичной обмотки при размещении ее на двух
стержнях

$$m_2 = \frac{W_2}{2n_2};$$

при размещении на одном стержне

$$m_2 = \frac{W_2}{n_2}.$$

Здесь обычно уточняется диаметр провода $d_{2н}$ так, чтобы
можно было получить один или два полных слоя вторичной
обмотки на длине l_1 .

Толщина вторичной обмотки

$$\delta_2 = m_2 d_{2н} \text{ [см]},$$

где W_2 берется из позиции 5.

При импульсном режиме работы трансформатора для умень-
шения искажения прямоугольных импульсов напряжения не-
обходимо, чтобы трансформатор обладал возможно малыми
паразитными параметрами обмоток—индуктивностью рассеяния
их L_s и распределенной емкостью C_p . В этом случае волновое
сопротивление обмоток импульсного трансформатора будет:

$$z_r = \sqrt{\frac{L_s}{C_p}} \text{ [ом]},$$

где индуктивность рассеяния первичной и вторичной обмоток,
приведенная к первичной по известной формуле

$$L_s = \frac{0,4\pi W_1^2 l_w}{l_s} \left(\delta_{12} + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} \right) 10^{-8} \text{ [гн]},$$

и распределенная емкость между обмотками при однослойном
или двухслойном исполнении их по формуле плоского конден-
сатора [Л. 7]:

$$C_p = \frac{0,0885 \epsilon l_w l_s}{\delta_{12}} \cdot 10^{-12} \text{ [ф]};$$

при этом:

δ_{12} —толщина изоляции между первичной и вторичной обмотками трансформатора, *см*;

l_w —средняя длина витка обмоток, *см*;

l_s —общая длина обмоток по высоте стержней сердечника, *см*; при расположении обмоток на одном стержне $l_s \approx l_1$, на двух— $l_s \approx 2l_1$;

$\epsilon = 3 \div 4$ —диэлектрическая проницаемость изоляции.

Максимальный коэффициент передачи энергии импульса при заданных значениях длительности импульса и сопротивления нагрузки R_n теоретически будет при условии равенства волнового сопротивления трансформатора и приведенного сопротивления нагрузки:

$$z_r = \sqrt{\frac{L_s}{C_p}} \approx R'_n.$$

Тогда, пренебрегая толщинами обмоток δ_1 и δ_2 , получим приближенно следующее значение толщины изоляции между обмотками импульсного трансформатора:

$$\delta_{12} = \frac{R'_n l_s \sqrt{\epsilon}}{377 W_1} [\text{см}],$$

где R'_n —активное сопротивление нагрузки, приведенное к первичной обмотке:

$$R'_n = R_n \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2.$$

Однако по условиям электрической прочности изоляции между обмотками на практике нередко приходится отступать от полученного значения δ_{12} в сторону увеличения.

Ширина окна сердечника трансформатора при размещении обмоток на двух стержнях (рис. 40) будет:

$$b = 2(\epsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2) + \epsilon_2 \dots [\text{см}],$$

где

$\epsilon_0 = 0,2 \div 0,6$ *см*—толщина изоляции между обмоткой и стержнем (*см*), выполняемой обычно из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824-45);

ϵ_2 —расстояние между наружными поверхностями обмоток (*см*), определяемое по табл. 13.

При размещении обмоток на одном стержне

$$b = \epsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \epsilon'_2 [\text{см}],$$

где ϵ_2 —расстояние обмотки до необмотанного стержня, определяемое по табл. 12.

Отношение высоты окна сердечника к ширине его обычно составляет:

$$k = \frac{H}{b} = 2 \div 3.$$

Длина ярма

$$l_{\text{я}} = b + 2a_c \text{ [см]}.$$

Общая длина магнитопровода сердечника трансформатора окончательно будет:

$$l = 2(H + l_{\text{я}}) \text{ [см]},$$

где a_c берется из позиции 4; H — высота окна сердечника, см.

Окончательное значение отношения поперечного сечения стержня S_c к длине магнитопровода l будет:

$$\psi = \frac{S_c}{l},$$

где S_c берется из позиции 4 главы четвертой.

Таблица 13

Высшее напряжение, кв	Расстояние между обмотками соседних стержней ε_2 , см
До 0,5	0,1—0,2
0,5—2,0	0,2—0,4
3,0—6,0	0,6—0,8
Свыше 6,0 до 12,0	1,0—1,4

8. Средние длины витков обмоток трансформатора

Так как в импульсных трансформаторах поперечное сечение стержня выполняется прямоугольной формы, то при однослойных или двухслойных цилиндрических обмотках средние длины витков их можно представить следующим образом:

средняя длина витка первичной обмотки

$$l_{w1} = 2(a_c + b_c + 4\varepsilon_0 + 2\delta_1) \text{ [см]},$$

средняя длина витка вторичной обмотки

$$l_{w2} = 2[a_c + b_c + 4(\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12}) + 2\delta_2] \text{ [см]},$$

средняя длина витка обеих обмоток

$$l_w = \frac{l_{w1} + l_{w2}}{2} \text{ [см]},$$

где a_c и b_c берутся из позиции 4, δ_1 , δ_2 , δ_{12} и ε_0 — из позиции 7.

9. Вес меди и активные сопротивления обмоток

Вес меди первичной обмотки

$$G_{m1} = 8,9 W_1 q_1 l_{w1} \cdot 10^{-5} [\text{кг}];$$

вес меди вторичной обмотки

$$G_{m2} = 8,9 W_2 q_2 l_{w2} \cdot 10^{-5} [\text{кг}];$$

общий вес меди обмоток

$$G_m = G_{m1} + G_{m2} [\text{кг}].$$

Активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора при 75°С будут:

$$r_1 = 1,22 \cdot \frac{W_1 l_{w1}}{5700 q_1} [\text{ом}],$$

$$r_2 = 1,22 \cdot \frac{W_2 l_{w2}}{5700 q_2} [\text{ом}],$$

где W_1 и W_2 берутся из позиции 5, q_1 и q_2 — из позиции 6, l_{w1} и l_{w2} — из позиции 8.

10. Потери в меди обмоток

Так как в обмотках импульсных трансформаторов проходят короткие прямоугольные импульсы тока, то потери в меди их обуславливаются не только омическим сопротивлением, но также явлением поверхностного эффекта в проводах и влиянием тока наводки в них при прохождении по обмоткам тока импульса. Средние потери в меди этих обмоток зависят от действующих значений токов в них и определяются по известным формулам:

$$P_{m1} = I_{1\text{эф}}^2 r_1 [\text{Вт}],$$

$$P_{m2} = I_{2\text{эф}}^2 r_2 [\text{Вт}],$$

$$P_m = P_{m1} + P_{m2} [\text{Вт}],$$

где $I_{\text{эф}}$ и $I_{2\text{эф}}$ берутся из позиции 1, r_1 и r_2 — из позиции 9.

11. Вес стали сердечника трансформатора

В случае сердечника трансформатора стержневого типа вес его будет:

$$G_c = 7,8 S_c l \cdot 10^{-3} [\text{кг}],$$

где S_c берется из позиции 4, l — из позиции 7.

12. Потери в стали сердечника

Средние потери на вихревые токи в стали сердечника импульсного трансформатора за период посылки импульса можно определить следующим образом [Л. 5]:

$$P_{\text{вх}} = \frac{f_n \tau_n \delta_c^2 l U_1^2 \cdot 10^{-6}}{12 W_1^2 S_c \rho_c} [\text{вт}],$$

где U_1 , f_n и τ_n берутся из задания, δ_c и ρ_c —из позиции 3, S_c —из позиции 4, W_1 —из позиции 5, l —из позиции 7.

Потерями на гистерезис в стали сердечника трансформатора практически можно пренебречь, как относительно малыми.

Средняя мощность намагничивания стали сердечника импульсного трансформатора будет:

$$P_m = f_n \frac{U_1^2}{L_1} \int_0^{\tau_n} t dt = f_n \frac{U_1^2}{L_1} \cdot \frac{\tau_n^2}{2} [\text{вт}],$$

так как намагничивающий ток этого трансформатора за время импульса $i_\mu = \frac{U_1}{L_1} t$; при этом общая индуктивность первичной обмотки трансформатора

$$L_1 = \frac{0,4\pi W_1^2 \mu_\Delta S_c \cdot 10^{-8}}{l} [\text{гн}],$$

где U_1 , f_n и τ_n берутся из задания, μ_Δ —из позиции 3, S_c —из позиции 4, W_1 —из позиции 5, l —из позиции 7.

13. Коэффициент полезного действия трансформатора

Так как при передаче импульсов энергия, затрачиваемая за это время на намагничивание сердечника, является энергией потерь, то коэффициент полезного действия импульсного трансформатора определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{ср}} + P_m + P_{\text{вх}} + P_m} \cdot 100,$$

где $P_{\text{ср}}$ берется из позиции 1, P_m —из позиции 10, $P_{\text{вх}}$ и P_m —из позиции 12.

14. Намагничивающий ток трансформатора

Намагничивающий ток импульсного трансформатора состоит из двух составляющих—действительного намагничивающего тока и составляющей, компенсирующей влияние размагничивающего действия вихревых токов в сердечнике транс-

форматора. Сумма этих составляющих называется током кажущегося намагничивания, который определяется с помощью следующего соотношения [Л. 5]:

$$I_{\text{кп}} \approx \frac{80 \cdot \tau_n l}{\mu_{\Delta} W_1^2 S_c} U_1 [a],$$

где

τ_n —длительность импульса напряжения, *мксек*;
 U_1 и τ_n берутся из задания, μ_{Δ} — из позиции 3, S_c —из позиции 4, W_1 —из позиции 5, l —из позиции 7.

15. Параметры импульсного трансформатора и проверка искажения трансформируемого импульса напряжения

Активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора (позиция 9)

$$r_1 = \dots \text{ом}; \quad r'_2 = r_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 [\text{ом}],$$

где W_1 и W_2 берутся из позиции 5.

Эквивалентное активное сопротивление контуров вихревых токов в стали сердечника трансформатора, приведенное к числу витков первичной обмотки [Л. 5]

$$r_{\text{вх}} = \frac{12 W_1^2 S_c \rho_c}{\delta_c^2 l} [\text{ом}],$$

где δ_c и ρ_c берутся из позиции 3, S_c —из позиции 4, W_1 —из позиции 5, l —из позиции 7.

Активные сопротивления упрощенной схемы замещения трансформатора (рис. 34)

$$R_1 = R_n + r_1; \quad R'_n = R_n \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2;$$

$$R'_2 = \frac{r_{\text{вх}} (R'_n + r'_2)}{r_{\text{вх}} + R'_n + r'_2} [\text{ом}].$$

Индуктивность рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора, приведенная к числу витков первичной обмотки по известной формуле (позиция 7)

$$L_s = \frac{0,4\pi W_1^2 l_w}{l_s} \left(\delta_{12} + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} \right) 10^{-8} [\text{гн}].$$

Распределенная емкость между обмотками при однослойном или двухслойном исполнении их (позиция 7)

$$C_p = \frac{0,0885 \varepsilon l_w l_s}{\delta_{12}} \cdot 10^{-12} [\text{ф}],$$

где W_1 берется из позиции 5, δ_1 , δ_2 , δ_{12} , ε и l_s —из позиции 7, l_w —из позиции 8.

Волновое сопротивление обмоток импульсного трансформатора по уравнению (10)

$$z_r = \sqrt{\frac{L_s}{C_p}} \text{ [ом]},$$

где принято $C'_2 = C_p$.

Электродвижущая сила источника прямоугольных импульсов напряжения с внутренним омическим сопротивлением $R_{\text{и}}$ и при активном сопротивлении первичной обмотки трансформатора r_1 по уравнениям (10) будет:

$$E = U'_2 (1 + \gamma_R) \text{ [в]},$$

где

$$U'_2 = U_2 \frac{W_1}{W_2}; \quad \gamma_R = \frac{R_1}{R_2}.$$

Характер переходных процессов в трансформаторе определяется уравнениями (11) — (13) в зависимости от величины параметра ρ .

16. Проверка трансформатора на нагревание

Так как потери в меди обмоток малоомощных импульсных трансформаторов относительно малы по сравнению с потерями в стали сердечника, то тепловой режим обмоток практически не представляет опасности и расчетную проверку их температуры можно не производить. Основные потери энергии в рассматриваемых трансформаторах сосредоточены в сердечнике их, что приводит к заметному нагреванию последнего. Установившееся превышение температуры сердечника трансформатора над температурой окружающей среды можно определить по известной формуле:

$$\theta \approx \frac{P_{\text{вх}} + P_m}{\alpha_0 S_{\text{сер}}} \text{ [}^\circ\text{C]},$$

где

$P_{\text{вх}} + P_m$ — потери в стали сердечника трансформатора из позиции 12, *вт*;

$\alpha_0 = (13 \div 15) 10^{-4}$ — коэффициент теплоотдачи открытой торцевой поверхности сердечника *вт/см² град*;

$S_{\text{сер}}$ — площадь открытой торцевой поверхности сердечника (*см²*), которая может быть определена следующим образом:

а) при размещении обмоток на одном стержне и сборке сердечника впереплет

$$S_{\text{сер}} \approx 4a_c b_c + 2b_c l_{\text{я}} + b_c \cdot H \text{ [см}^2\text{]},$$

б) при размещении обмоток на двух стержнях (рис. 40):

$$S_{\text{сер}} \approx 4a_c b_c + 2b_c l_a \text{ [см}^2\text{]},$$

где a_c и b_c берутся из позиции 4, H и l_a — из позиции 7.

В маломощных трансформаторах допустимое превышение температуры сердечника над окружающей средой при воздушном охлаждении может составлять $\theta = 65 \div 75^\circ \text{C}$ при температуре этой среды 35°C .

III. ПРИМЕР РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Задание

Мощность в импульсе $P_2 = 10 \text{ кВт}$.

Напряжения в импульсе: $U_1 = 500 \text{ в}$, $U_2 = 2000 \text{ в}$.

Сопротивление нагрузки $R_n = 400 \text{ ом}$.

Сопротивление источника $R_{\text{и}} = 30 \text{ ом}$.

Длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 1 \text{ мксек}$.

Частота следования импульсов $f_n = 1000 \text{ гц}$.

Коэффициент искажения импульса $\lambda = 0,06$.

1. Средняя мощность и токи трансформатора:

$$P_{\text{ср}} = f_n \tau_{\text{и}} P_2 = 1000 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^3 = 10 \text{ вт},$$

$$I_1 = \frac{P_2}{U_1} = \frac{10000}{500} = 20 \text{ а}; \quad I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{10000}{2000} = 5 \text{ а},$$

$$I_{1\text{эф}} = I_1 \sqrt{f_n \tau_{\text{и}} k_n k_{\text{п1}}} = 20 \sqrt{1000 \cdot 10^{-6} \cdot 2,4 \cdot 1,4} \approx 1,2 \text{ а},$$

$$I_{2\text{эф}} = I_2 \sqrt{f_n \tau_{\text{и}} k_n k_{\text{п2}}} = 5 \sqrt{1000 \cdot 10^{-6} \cdot 2,4 \cdot 1,1} \approx 0,26 \text{ а},$$

где принято:

$$k_{\text{п1}} = 1,4; \quad k_{\text{п2}} = 1,1.$$

2. Тип трансформатора. Выбираем сердечник трансформатора стержневого типа с однослойной первичной и двухслойной вторичной обмотками цилиндрического типа, расположенными на одном стержне.

Материал сердечника — листовая электротехническая сталь по ГОСТ 802-54 марки Э44 (старая марка ВЧ-1), толщина которой определяется ниже.

Охлаждение трансформатора — воздушное.

3. Выбор приращения индукции и толщины материала сердечника. По кривой рис. 38 принимаем:

$$\Delta B_c = 2000 \text{ гс}; \quad \Delta H = 2,5 \text{ э}; \quad \mu_{\Delta} = \frac{\Delta B_c}{\Delta H} = 800.$$

Далее примем:

$$T_{\text{вх}} \approx \frac{1}{3} \tau_{\text{и}} = 0,3 \text{ мксек},$$

тогда толщина листов сердечника будет:

$$\delta_c = \sqrt{\frac{\rho_c T_{вх} \cdot 10^4}{2\mu_\Delta}} = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,3 \cdot 10^4}{2 \cdot 800}} = 0,0097 \text{ см};$$

примем:

$$\delta_c = 0,01 \text{ см.}$$

4. Размеры сердечника трансформатора:

$$S_c = \frac{10}{\Delta B_c} \sqrt{\frac{\mu_\Delta \tau_n \lambda \psi P_2}{0,8}} = \frac{10}{2000} \sqrt{\frac{800 \cdot 1 \cdot 0,06 \cdot 0,20 \cdot 10\,000}{0,8}} \approx 1,8 \text{ см}^2;$$

$$l = \frac{S_c}{\psi} = \frac{1,8}{0,20} = 9 \text{ см},$$

где принято:

$$\psi = 0,20;$$

$$a_c = \sqrt{\frac{S_c}{k_3 \zeta}} = \sqrt{\frac{1,8}{0,85 \cdot 1,8}} \approx 1,1 \text{ см};$$

$$b_c = \zeta a_c = 1,8 \cdot 1,1 = 2,0 \text{ см.}$$

5. Число витков первичной и вторичной обмоток:

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot 10^3 \tau_n}{\Delta B_c S_c} = \frac{500 \cdot 10^3 \cdot 1}{2000 \cdot 1,8} \approx 14;$$

$$W_2 = W_1 \frac{U_2}{U_1} = 14 \cdot \frac{2000}{500} = 56;$$

$$e_w = \frac{U_1}{W_1} = \frac{500}{14} = 35,7 \text{ в/виток.}$$

6. Сечение и диаметр проводов обмоток:

$$q'_1 = \frac{I_{1\text{эф}}}{I'_1} = \frac{1,2}{3,0} = 0,40 \text{ мм}^2;$$

$$q'_2 = \frac{I_{2\text{эф}}}{I'_2} = \frac{0,26}{2,5} = 0,104 \text{ мм}^2.$$

Окончательные значения сечений и диаметров проводов обмоток по ГОСТ 6324-52 из приложения I принимаем:

$$q_1 = 0,407 \text{ мм}^2; \quad \frac{d_1}{d_{1н}} = \frac{0,72}{0,94} \text{ мм}; \text{ марка провода ПБД};$$

$$q_2 = 0,113 \text{ мм}^2; \quad \frac{d_2}{d_{2н}} = \frac{0,38}{0,49} \text{ мм}; \text{ марка провода ПЭЛШО.}$$

7. Укладка обмоток на сердечнике.

При размещении обмоток на одном стержне

$$l_1 = W_1 d_{1н} = 14 \cdot 0,094 \approx 1,35 \text{ см},$$

$$H = l_1 + 2\varepsilon_1 = 1,35 + 2 \cdot 0,22 \approx 1,8 \text{ см},$$

где из табл. 12 принято:

$$\epsilon_1 = 0,22 \text{ см}; \quad \delta_1 = d_{1н} \approx 0,09 \text{ см}.$$

Число витков в слое вторичной обмотки при двухслойном исполнении $m_2 = 2$:

$$n_2 = \frac{W_2}{m_2} = \frac{56}{2} = 28.$$

Диаметр изолированного провода вторичной обмотки

$$d_{2н} = \frac{l_1}{n_2} = \frac{13,5}{28} \approx 0,49 \text{ мм}.$$

Из приложения I по ГОСТ 6324-52 находим диаметр и сечение голого провода:

$$d_2 = 0,38 \text{ мм}; \text{ марка провода ПЭЛШО};$$

$$q_2 = 0,113 \text{ мм}^2; \quad \delta_2 = m_2 d_{2н} = 2 \cdot 0,049 \approx 0,10 \text{ см}.$$

Толщина изоляции между обмотками

$$\delta_{12} \approx \frac{R'_H l_s \sqrt{\epsilon}}{377 W_1} = \frac{25 \cdot 1,35 \cdot \sqrt{3,5}}{377 \cdot 14} = 0,012 \text{ см},$$

где

$$l_s \approx l_1 = 1,35 \text{ см}; \quad R'_H = R_H \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 = 400 \left(\frac{14}{56} \right)^2 = 25 \text{ ом}$$

и принято $\epsilon = 3,5$.

В качестве изоляции между обмотками примем лакоткань ЛШС1 толщиной 0,12 мм (ГОСТ 2214-46).

Ширина окна сердечника трансформатора при размещении обмоток на одном стержне

$$b = \epsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \epsilon'_2 = 0,2 + 0,09 + 0,012 + 0,10 + 0,4 \approx 0,8 \text{ см},$$

где принято:

$$\epsilon_0 = 0,2 \text{ см}; \quad \epsilon'_2 = 0,4 \text{ см}.$$

Отношение

$$k = \frac{H l}{b} = \frac{1,8}{0,8} = 2,2$$

находится в допустимых пределах.

Длина ярма

$$l_{я} = b + 2a_c = 0,8 + 2 \cdot 1,1 = 3,0 \text{ см}.$$

Общая длина магнитопровода сердечника окончательно

$$l = 2(H + l_{я}) = 2(1,8 + 3,0) = 9,6 \text{ см}.$$

Окончательное отношение

$$\phi = \frac{S_c}{l} = \frac{1,8}{9,6} = 0,19.$$

8. Средние длины витков обмоток:

$$l_{w1} = 2(a_c + b_c + 4\varepsilon_0 + 2\delta_1) = 2(1,1 + 2,0 + 4 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,09) \approx 8,2 \text{ см}$$

$$l_{w2} = 2[a_e + b_c + 4(\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12}) + 2\delta_2] = 2[1,1 + 2,0 + 4 \times \\ \times (0,2 + 0,09 + 0,012) + 2 \cdot 0,10] \approx 9,1 \text{ см};$$

$$l_w = \frac{l_{w1} + l_{w2}}{2} = \frac{8,2 + 9,1}{2} \approx 8,6 \text{ см.}$$

9. Вес меди и активные сопротивления обмоток при 75°С:

$$G_{m1} = 8,9 W_1 q_1 l_{w1} \cdot 10^{-5} = 8,9 \cdot 14 \cdot 0,407 \cdot 8,2 \cdot 10^{-5} = 0,0042 \text{ кг};$$

$$G_{m2} = 8,9 W_2 q_2 l_{w2} \cdot 10^{-5} = 8,9 \cdot 56 \cdot 0,113 \cdot 9,1 \cdot 10^{-5} = 0,0052 \text{ кг};$$

$$G_m = G_{m1} + G_{m2} = 0,0042 + 0,0052 = 0,0094 \text{ кг};$$

$$r_1 = 1,22 \frac{W_1 l_{w1}}{5700 q_1} = 1,22 \cdot \frac{14 \cdot 8,2}{5700 \cdot 0,407} = 0,06 \text{ ом};$$

$$r_2 = 1,22 \frac{W_2 l_{w2}}{5700 q_2} = 1,22 \cdot \frac{56 \cdot 9,1}{5700 \cdot 0,113} = 0,11 \text{ ом.}$$

10. Потери в меди обмоток при 75°С:

$$P_{m1} = I_{1\phi}^2 r_1 = 1,22^2 \cdot 0,06 \approx 0,086 \text{ Вт};$$

$$P_{m2} = I_{2\phi}^2 r_2 = 0,26^2 \cdot 0,11 \approx 0,074 \text{ Вт};$$

$$P_m = P_{m1} + P_{m2} = 0,086 + 0,074 = 0,16 \text{ Вт.}$$

11. Вес стали сердечника

$$G_c = 7,8 S_c l \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot 1,8 \cdot 9,6 \cdot 10^{-3} = 0,135 \text{ кг.}$$

12. Потери в стали сердечника:

$$P_{вх} = \frac{f_n \tau_n \delta_c^2 l U_1^2 \cdot 10^{-6}}{12 W_1^2 S_{ср}} = \frac{1000 \cdot 1 \cdot 0,01^2 \cdot 9,6 \cdot 500^2 \cdot 10^{-6}}{12 \cdot 14^2 \cdot 1,8 \cdot 0,5 \cdot 10^{-4}} \approx 1,14 \text{ Вт},$$

$$P_m = f_n \frac{U_1^2}{L_1} \frac{\tau_n^2}{2} = 1000 \cdot \frac{500^2}{0,37 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{10^{-12}}{2} = 0,33 \text{ Вт},$$

где

$$L_1 = \frac{0,4\pi W_1^2 \mu_{\Delta} S_c \cdot 10^{-8}}{l} = \frac{0,4\pi \cdot 14^2 \cdot 800 \cdot 1,8 \cdot 10^{-8}}{9,6} = 0,37 \cdot 10^{-3} \text{ гн.}$$

13. Коэффициент полезного действия трансформатора:

$$\eta = \frac{P_{ср}}{P_{ср} + P_m + P_{вх} + P_m} \cdot 100 = \\ = \frac{10}{10 + 0,16 + 1,14 + 0,33} \cdot 100 \approx 86\%.$$

14. Намагничивающий ток трансформатора:

$$I_{\text{к\mu}} \approx \frac{80\tau_n IU_1}{\mu_{\Delta} W_1^2 S_c} = \frac{80 \cdot 1 \cdot 9,6 \cdot 500}{800 \cdot 14^2 \cdot 1,8} = 1,36 \text{ а},$$

или

$$\lambda = \frac{I_{\text{к\mu}}}{I_1} = \frac{1,36}{20} = 0,068;$$

было принято $\lambda = 0,06$.

15. Параметры трансформатора и проверка искажения импульса напряжения.

Активные сопротивления обмоток

$$r_1 = 0,06 \text{ ом}; \quad r'_2 = r_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 = 0,11 \left(\frac{14}{56} \right)^2 = 0,069 \text{ ом};$$

эквивалентное активное сопротивление контуров вихревых токов в стали сердечника

$$r_{\text{вх}} = \frac{12 W_1^2 S_c \rho_c}{\delta_c^2 l} = \frac{12 \cdot 14^2 \cdot 1,8 \cdot 0,5 \cdot 10^{-4}}{0,01^2 \cdot 9,6} = 221 \text{ ом},$$

$$R_1 = R_n + r_1 = 30 + 0,06 = 30,06 \text{ ом};$$

$$R'_n = R_n \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 = 400 \left(\frac{14}{56} \right)^2 = 25 \text{ ом};$$

$$R'_2 = \frac{r_{\text{вх}} (R'_n + r'_2)}{r_{\text{вх}} + R'_n + r'_2} = \frac{221 (25 + 0,069)}{221 + 25 + 0,069} = 22,5 \text{ ом};$$

индуктивность рассеяния обмоток

$$\begin{aligned} L_s &= \frac{0,4\pi W_1^2 l_w}{l_s} \left(\delta_{12} + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} \right) 10^{-8} = \\ &= \frac{0,4\pi \cdot 14^2 \cdot 8,6}{1,35} \left(0,012 + \frac{0,09 + 0,10}{3} \right) 10^{-8} = 0,112 \cdot 10^{-5} \text{ гн}; \end{aligned}$$

распределенная емкость между обмотками

$$C_p = \frac{0,0885 \epsilon l_w l_s}{\delta_{12}} \cdot 10^{-12} = \frac{0,0885 \cdot 3,5 \cdot 8,6 \cdot 1,35 \cdot 10^{-12}}{0,012} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ ф},$$

где принято $\epsilon = 3,5$;

волновое сопротивление обмоток трансформатора

$$z_z = \sqrt{\frac{L_s}{C_p}} = \sqrt{\frac{0,112 \cdot 10^{-5}}{3 \cdot 10^{-10}}} = 61,0 \text{ ом};$$

электродвижущая сила источника прямоугольных импульсов напряжения

$$E = U'_2 (1 + \gamma_R) = 500 (1 + 1,33) = 1165 \text{ в},$$

где

$$U'_2 = U_2 \frac{W_1}{W_2} = 2000 \cdot \frac{14}{56} = 500 \text{ в;}$$

$$\gamma_R = \frac{R_1}{R_2} = \frac{30,06}{22,5} = 1,33.$$

Параметр, определяющий характер переходных процессов в обмотках трансформатора

$$\rho = \frac{1}{2 \sqrt{1 + \gamma_R}} \left(\frac{z_r}{R_2} + \gamma_R \frac{R'_2}{z_r} \right) = \frac{1}{2 \sqrt{1 + 1,33}} \times \\ \times \left(\frac{61,0}{22,5} + 1,33 \frac{22,5}{61,0} \right) = 1,04.$$

Так как $\rho > 1$, то в проектируемом трансформаторе переходные процессы при трансформации импульса носят апериодический характер.

Паразитная постоянная времени трансформатора

$$T_1 = \sqrt{\frac{L_s C_p}{1 + \gamma_R}} = \sqrt{\frac{0,112 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \cdot 10^{-10}}{1 + 1,33}} = 0,012 \cdot 10^{-6} \text{ сек,}$$

или 0,012 мксек;

$$s_1 = \rho - \sqrt{\rho^2 - 1} = 1,04 - \sqrt{1,04^2 - 1} = 0,757;$$

$$s_2 = \rho + \sqrt{\rho^2 - 1} = 1,04 + \sqrt{1,04^2 - 1} = 1,323;$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 - 1}} - 1 \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1,04}{\sqrt{1,04^2 - 1}} - 1 \right) = 1,33;$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 - 1}} + 1 \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1,04}{\sqrt{1,04^2 - 1}} + 1 \right) = 2,33.$$

Уравнение импульса вторичного напряжения в относительных единицах

$$\frac{u'_2}{U'_2} = 1 + \alpha_1 e^{-s_1 \frac{t}{T_1}} - \alpha_2 e^{-s_2 \frac{t}{T_1}} = 1 + 1,33 e^{-0,757 \cdot \frac{t}{0,012 \cdot 10^{-6}}} - \\ - 2,33 e^{-1,323 \cdot \frac{t}{0,012 \cdot 10^{-6}}}.$$

Так как паразитная постоянная времени трансформатора $T_1 = 0,012 \text{ мксек}$, то фронт импульса

$$\tau_\Phi \approx 3T_1 = 3 \cdot 0,012 = 0,036 \text{ мксек,}$$

или 3,6% от длительности импульса $\tau_n = 1$ мксек; следовательно, искажение трансформируемого импульса напряжения незначительно, поскольку через $\tau_\phi \approx 0,04$ мксек $-\frac{u_2'}{U_2} \approx 1$.

16. Проверка трансформатора на нагревание.

Открытая поверхность охлаждения сердечника трансформатора

$$S_{\text{сер}} \approx 4a_c b_c + 2b_c l_a + b_c H = 4 \cdot 1,1 \cdot 2,0 + 2 \cdot 2 \cdot 3 + 2 \cdot 1,8 = 24,4 \text{ см}^2;$$

превышение температуры сердечника над окружающей средой

$$\theta = \frac{P_{\text{вх}} + P_m}{\alpha_0 S_{\text{сер}}} = \frac{1,14 + 0,33}{14 \cdot 10^{-4} \cdot 24,4} = 52^\circ \text{C},$$

что вполне допустимо.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Обозначения, размеры и марки проводов по ГОСТ 2773-51, 7262-54 и 6324-52

ГОСТ 2773-51:

ПЭЛ — провод эмалированный лакостойкий;

ПЭТ — провод эмалированный лакостойкий с повышенной теплостойкостью;

ГОСТ 7262-54:

ПЭВ-2 — провод, изолированный высокопрочной эмалью в два слоя.

ГОСТ 6324-52.

ПЭЛШО — провод, изолированный лакостойкой эмалью и одним слоем обмотки из натурального шелка;

ПЭЛШКО — провод, изолированный лакостойкой эмалью и одним слоем шелка капрон;

ПБД — провод, изолированный двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи.

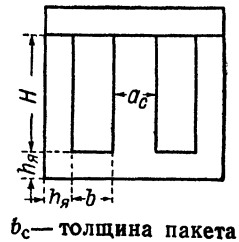
Диаметр голого провода мм	Сечение голого провода мм ²	Диаметр провода с изоляцией			
		ГОСТ 2773-51	ГОСТ 7262-54	ГОСТ 6324-52	
		ПЭЛ и ПЭТ	ПЭВ-2	ПЭЛШО и ПЭЛШКО	ПБД
0,05	0,00196	0,065	0,08	0,12	—
0,06	0,00283	0,075	0,09	0,13	—
0,07	0,00385	0,085	0,10	0,14	—
0,08	0,00502	0,095	0,11	0,15	—
0,09	0,00686	0,105	0,12	0,16	—
0,10	0,00785	0,120	0,13	0,175	—
0,11	0,00950	0,130	0,14	0,185	—
0,12	0,0113	0,140	0,15	0,195	—
0,13	0,0132	0,150	0,16	0,205	—
0,14	0,0158	0,160	0,17	0,215	—
0,15	0,0176	0,170	0,19	0,225	—
0,16	0,0201	0,180	0,20	0,235	—
0,17	0,0227	0,190	0,21	0,245	—
0,18	0,0254	0,200	0,22	0,255	—
0,19	0,0283	0,210	0,23	0,265	—
0,20	0,0314	0,225	0,24	0,290	0,39
0,21	0,0346	0,235	0,25	0,300	0,40
0,23	0,0415	0,255	0,28	0,320	0,42
0,25	0,0440	0,275	0,30	0,340	0,44
0,27	0,0572	0,305	0,32	0,370	0,49
0,29	0,0660	0,325	0,34	0,390	0,51
0,31	0,0754	0,350	0,36	0,415	0,53

Продолжение

Диаметр голого провода, мм	Сечение голого провода, мм ²	Диаметр провода с изоляцией			
		ГОСТ 2773-51	ГОСТ 7262-54	ГОСТ 6324 52	
		ПЭЛ и ПЭТ	ПЭВ-2	ПЭЛШО и ПЭЛШКО	ПБД
0,33	0,0855	0,370	0,38	0,435	0,55
0,35	0,0962	0,390	0,41	0,455	0,57
0,38	0,113	0,420	0,44	0,490	0,60
0,41	0,132	0,450	0,47	0,520	0,63
0,44	0,152	0,485	0,50	0,550	0,66
0,47	0,173	0,515	0,53	0,580	0,69
0,49	0,188	0,535	0,55	0,600	0,71
0,51	0,204	0,560	0,58	0,625	0,73
0,53	0,220	0,580	0,60	0,645	0,75
0,55	0,237	0,600	0,62	0,665	0,77
0,57	0,255	0,620	0,64	0,685	0,79
0,59	0,273	0,640	0,66	0,705	0,81
0,62	0,301	0,670	0,70	0,735	0,84
0,64	0,321	0,690	0,72	0,755	0,86
0,67	0,353	0,720	0,75	0,785	0,89
0,69	0,374	0,740	0,77	0,805	0,91
0,72	0,407	0,780	0,80	0,845	0,94
0,74	0,430	0,800	0,83	0,865	0,96
0,77	0,466	0,830	0,86	0,895	0,99
0,80	0,503	0,860	0,89	0,925	1,02
0,83	0,541	0,890	0,92	0,955	1,05
0,86	0,581	0,920	0,95	0,985	1,08
0,90	0,636	0,960	0,99	1,025	1,12
0,93	0,679	0,990	1,02	1,055	1,15
0,96	0,724	1,020	1,05	1,085	1,18
1,00	0,785	1,070	1,11	1,135	1,27
1,04	0,850	1,115	1,15	1,175	1,31
1,08	0,916	1,155	1,19	1,215	1,35
1,12	0,985	1,195	1,23	1,255	1,39
1,16	1,057	1,235	1,27	1,295	1,43
1,20	1,130	1,280	1,31	1,335	1,47
1,25	1,210	1,330	1,36	1,385	1,52
1,30	1,330	1,380	1,41	1,435	1,57
1,35	1,430	1,430	1,46	1,485	1,62
1,40	1,540	1,480	1,51	1,535	1,67
1,45	1,650	1,530	1,56	1,585	1,72
1,50	1,770	1,580	1,61	1,655	1,77
1,56	1,91	1,640	1,67	1,715	1,83
1,62	2,06	1,700	1,73	1,755	1,89
1,68	2,21	1,760	1,79	1,835	1,95
1,74	2,37	1,820	1,85	1,895	2,01
1,81	2,57	1,890	1,93	1,965	2,08
1,88	2,77	1,960	2,00	2,035	2,15
1,95	2,99	2,030	2,07	2,105	2,22
2,02	3,20	2,100	2,14	2,175	2,29
2,10	3,46	2,180	2,23	2,255	2,37
2,26	4,02	2,340	2,39	2,415	2,53
2,44	4,65	2,520	2,57	2,595	2,71

Сердечники из пластин «безотходной» штамповки по нормали СТ-360А

Тип сердечника	Размеры сердечника, мм				
	a_c	b_c	h_y	H	b
Ш-10 × 10	10	10	5	15	5
Ш-10 × 15	10	15	5	15	5
Ш-10 × 20	10	20	5	15	5
Ш-12 × 12	12	12	6	18	6
Ш-12 × 18	12	18	6	18	6
Ш-12 × 24	12	24	6	18	6
Ш-14 × 14	14	14	7	21	7
Ш-14 × 21	14	21	7	21	7
Ш-14 × 28	14	28	7	21	7
Ш-16 × 16	16	16	8	24	8
Ш-16 × 24	16	24	8	24	8
Ш-16 × 32	16	32	8	24	8
Ш-18 × 18	18	18	9	27	9
Ш-18 × 27	18	27	9	27	9
Ш-18 × 36	18	36	9	27	9
Ш-20 × 20	20	20	10	30	10
Ш-20 × 30	20	30	10	30	10
Ш-20 × 40	20	40	10	30	10
Ш-24 × 24	24	24	12	36	12
Ш-24 × 36	24	36	12	36	12
Ш-24 × 48	24	48	12	36	12
Ш-30 × 30	30	30	15	45	15
Ш-30 × 45	30	45	15	45	15
Ш-30 × 60	30	60	15	45	15
Ш-40 × 40	40	40	20	60	20
Ш-40 × 60	40	60	20	60	20
Ш-40 × 80	40	80	20	60	20



Сердечники из пластин «безотходной» штамповки с уширенным яром

Тип сердечника	Размеры сердечника, мм				
	a_c	b_c	h_g	H	b
Ш-10 × 10	10	10	6,5	18	6,5
Ш-10 × 15	10	15	6,5	18	6,5
Ш-10 × 20	10	20	6,5	18	6,5
Ш-12 × 12	12	12	8	22	8
Ш-12 × 18	12	18	8	22	8
Ш-12 × 24	12	24	8	22	8
Ш-14 × 14	14	14	9	25	9
Ш-14 × 21	14	21	9	25	9
Ш-14 × 28	14	28	9	25	9
Ш-16 × 16	16	16	10	28	10
Ш-16 × 24	16	24	10	28	10
Ш-16 × 32	16	32	10	28	10
Ш-19 × 19	19	19	12	33,5	12
Ш-19 × 28	19	28	12	33,5	12
Ш-19 × 38	19	38	12	33,5	12
Ш-22 × 22	22	22	14	39	14
Ш-22 × 33	22	33	14	39	14
Ш-22 × 44	22	44	14	39	14
Ш-26 × 26	26	26	17	47	17
Ш-26 × 39	26	39	17	47	17
Ш-26 × 52	26	52	17	47	17
Ш-30 × 30	30	30	19	53	19
Ш-30 × 45	30	45	19	53	19
Ш-30 × 60	30	60	19	53	19
Ш-35 × 35	35	35	22	61,5	22
Ш-35 × 52	35	52	22	61,5	22
Ш-35 × 70	35	70	22	61,5	22

Сталь электротехническая тонколистовая ГОСТ 802-54

Марки стали

Листовая электротехническая сталь по степени легирования ее кремнием, магнитным и электрическим свойствам подразделяется на следующие марки.

Э11, Э12

Э21

Э31, Э34, Э310, Э320, Э330, Э340, Э370

Э41, Э42, Э43, Э44, Э45, Э46, Э47, Э48.

Буквы и цифры в марках электротехнической стали условно обозначают:

Э — электротехническая сталь;

первая цифра (1, 2, 3, 4,) — степень легирования кремнием:

1 — слаболегированная сталь (с содержанием кремния до 1 %),

2 — среднелегированная сталь,

3 — повышенолегированная сталь,

4 — высоколегированная сталь (с содержанием кремния до 5 %);

вторая цифра (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) — гарантированные электромагнитные свойства стали.

1, 2, 3 — удельные потери при перемагничивании стали с частотой 50 гц и магнитная индукция в сильных полях,

4 — удельные потери при перемагничивании стали с частотой 400 гц и магнитная индукция в средних полях,

5, 6 — магнитная проницаемость в слабых полях (менее 0,01 ав/см),

7, 8 — магнитная проницаемость в средних полях (от 0,1 до 1 ав/см),

третья цифра (0) — обозначает, что сталь холоднокатанная.

Толщина и размеры листов стали

Марки стали	Толщина мм	Ширина мм	Длина мм
Э11, Э12, Э21, Э31	0,5	750 1000	1500 2000
Э31, Э34, Э41, Э42, Э43, Э44, Э45, Э46, Э47, Э48	0,35	750	1500
Э41, Э42, Э43	0,35 и 0,5	1000	2000
Э310, Э320, Э330	0,5	750	1500
Э310, Э320, Э330, Э340, Э370	0,35	750	1500
Э340, Э370	0,20	240	1500
Э44, Э45, Э46, Э47, Э48	0,20 0,15 0,10	700	1400

Магнитные свойства и удельные потери некоторых марок стали (табл. 1 и 2)

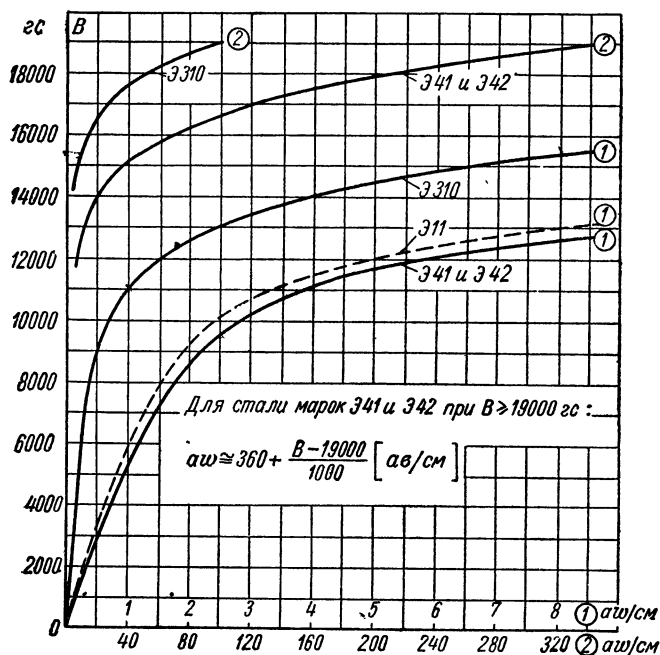


Рис. 41. Кривые намагничивания стали марок Э11, Э41, Э42 и Э310

Таблица 1

Марка стали	Толщина, мм	Магнитная индукция в гауссах при напряженности магнитного поля, ав/см					Удельные потери, вт/кг		
		B_{10}	B_{15}	B_{20}	B_{150}	B_{300}	$P_{10/40}$	$P_{15/60}$	$P_{17/80}$
		не менее					не более		
Э11	0,5	—	15 000	16 200	17 500	19 700	5,8	13,4	—
Э41	0,5	13 000	14 500	15 600	16 800	18 800	1,60	3,60	—
Э41	0,35	13 000	14 500	15 600	16 800	18 800	1,35	3,20	—
Э42	0,5	12 900	14 400	15 500	16 600	18 700	1,40	3,20	—
Э42	0,35	12 900	14 400	15 500	16 600	18 700	1,20	2,80	—
Э310	0,5	15 700	17 000	18 000	19 000	19 800	1,25	2,80	3,80
Э310	0,35	15 700	17 000	18 000	19 000	19 800	1,00	2,20	3,20

Таблица 2

Марка стали	Толщина мм	Магнитная индукция в гауссах при напряженности магнитного поля, $ав/см$			Удельные потери, $вт/кг$	
		B_5	B_{10}	B_{25}	$P_{7,5/400}$	$P_{10/400}$
		не менее			не более	
Э340	0,35	14 600	15 700	17 000	12,0	21,0
Э340	0,20	14 000	15 500	16 700	7,0	12,0
Э44	0,35	11 800	12 900	14 300	10,7	19,0
Э44	0,20	11 800	12 800	14 200	7,2	12,5
Э44	0,15	11 600	12 800	14 100	6,8	11,7
Э44	0,10	11 500	12 700	14 000	6,0	10,5

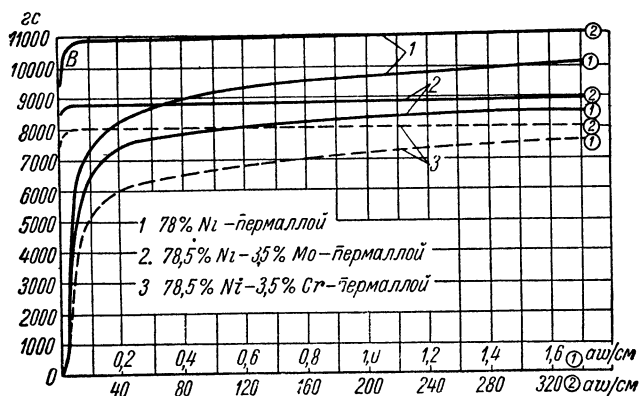


Рис. 42. Кривые намагничивания пермаллоя разных марок

Среднее удельное электрическое сопротивление стали

Э11, Э12	0,25	ом·мм ² /м
Э21	0,40	»
Э31, Э310, Э320, Э330, Э340	0,50	»
Э41, Э42, Э43, Э44	0,58	»

Лакоткань электроизоляционная
ГОСТ 2214-46

Марки лакоткани

Хлопчатобумажная:

ЛХ1 — нормальная, с повышенными диэлектрическими свойствами,
ЛХ2 — нормальная, ЛХМ — маслостойкая, ЛХС — специальная.

Шелковая.

ЛШ1 — нормальная, с повышенными диэлектрическими свойствами,
ЛШ2 — нормальная, ЛШС1 — специальная, с повышенными диэлектрическими свойствами, ЛШС2 — специальная, ЛШС — специальная, тонкая.

Технические условия

1. Ширина лакоткани — от 700 до 1000 мм.

2. Толщина лакоткани (мм).

ЛХ1	0,15; 0,17; 0,20; 0,24
ЛХ2	0,15, 0,17; 0,20; 0,24; 0,30
ЛХМ	0,17; 0,20; 0,24
ЛХС	0,17; 0,20
ЛШ1	0,10, 0,15
ЛШ2	0,08; 0,10; 0,12; 0,15
ЛШС1	0,12
ЛШС2	0,12
ЛШС	0,04; 0,05; 0,06

3. Пробивное напряжение лакоткани при температуре $20 \pm 5^\circ \text{C}$ должно быть не менее указанного в табл. 1.

Таблица 1

Марка лакоткани	Толщина мм	Среднее пробивное напряжение после выдержки в течение 18 час. при темпера- туре $20 \pm 5^\circ \text{C}$ и относительной влажности воздуха $65 \pm 5^\circ \text{C}$, $k_{вэфф}$	Марка лакоткани	Толщина мм	Среднее пробивное напряжение после выдержки в течение 18 час при темпера- туре $20 \pm 5^\circ \text{C}$ и относительной влажности воздуха $65 \pm 5^\circ \text{C}$, $k_{вэфф}$
ЛХ1	0,15	4,2	ЛХМ	0,17	5,1
	0,17	4,8		0,20	6,1
	0,20	5,6		0,24	7,7
	0,24	6,7			
ЛХ2	0,15	3,3	ЛХС	0,17	4,7
	0,17	3,7		0,20	5,0
	0,20	4,4	ЛШС	0,04	0,3
	0,24	5,2		0,05	1,0
	0,30	6,6		0,06	2,0
ЛШ1	0,10	5,0	ЛШС1	0,12	7,6
	0,15	7,5		0,12	6,5
ЛШ2	0,08	2,7			
	0,10	3,6			
	0,12	4,3			
	0,15	5,4			

ПРИЛОЖЕНИЕ VI

Картон электроизоляционный марки ЭВ

ГОСТ 2824-45

Технические показатели электрокартона

Названия показателей	Нормы
Толщина, мм	0,1; 0,15; 0,2; 0,3, 0,4; 0,5; 1; 1,25, 1,5; 1,75, 2, 2,5; 3
Объемный вес ($г/см^3$) при 10% влажности для картона толщиной:	
от 0,1 до 0,5 мм	1,15
» 1 » 1,5 »	1,00
» 1,75 » 3 »	0,95
Пробивная напряженность ($кв_{эфф}/мм$) для картона толщиной	
от 0,1 до 0,3 мм	11
» 0,4 » 0,5 »	10
» 1 » 2 »	8
» 2,5 » 3 »	7,5
Пробивная напряженность ($кв_{эфф}/мм$) после одного перегиба в продольном направлении для картона толщиной.	
от 0,1 до 0,3 мм	6
» 0,4 » 0,5 »	5

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Видмар, Трансформаторы, ГОНТИ, 1931.
2. Д. В. Васильев, Расчет трансформаторов, изд. ЛПИ, 1933.
3. Н. П. Ермолин, Пиковый трансформатор, Изв. ЛЭТИ, вып. XXI, 1939.
4. Ф. В. Лукин, Импульсный трансформатор, „Радиотехника“, т. 2, № 4, 1947.
5. Я. С. Ицхоки, Импульсная техника, изд. „Советское радио“, 1949.
6. Г. С. Цыкин, Трансформаторы низкой частоты, Связьиздат, 1950.
7. Детали и элементы радиолокационных станций (перевод), т. II, изд. „Советское радио“, 1952.
8. Миниатюрный импульсный трансформатор, „Вестник информации“, № 9, изд. „Советское радио“, 1953.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
Глава первая. Мало мощные силовые трансформаторы	5
I. Общие замечания	—
II. Расчет мало мощных однофазных и трехфазных трансформаторов	14
1. Определение токов трансформатора	16
2. Выбор индукции в стержне и ярме сердечника трансформатора	17
3. Выбор плотности тока в проводах обмоток трансформатора	—
4. Определение поперечного сечения стержня и ярма сердечника трансформатора	20
5. Определение числа витков обмоток трансформатора	21
6. Определение сечения и диаметра проводов обмоток	22
7. Выбор изоляции проводов обмоток	—
8. Определение высоты и ширины окна сердечника трансформатора	23
9. Укладка обмоток на стержнях и уточнение размеров окна сердечника трансформатора	26
10. Вес меди обмоток трансформатора	27
11. Потери в меди обмоток трансформатора	28
12. Вес стали сердечника трансформатора	29
13. Потери в стали сердечника трансформатора	—
14. Определение тока холостого хода трансформатора	30
15. Коэффициент полезного действия трансформатора	31
16. Активные падения напряжения и сопротивления обмоток трансформатора	32
17. Индуктивные падения напряжения и сопротивления обмоток трансформатора	34
18. Полные сопротивления и напряжения короткого замыкания обмоток трансформатора	35
19. Изменение напряжения трансформатора при нагрузке	36
20. Проверка трансформатора на нагревание	37
21. Сводные данные расчета трансформатора	38
III. Пример расчета мало мощного однофазного трехобмоточного трансформатора	47
Глава вторая. Мало мощные силовые автотрансформаторы	47
I. Общие замечания	—
II. Расчет мало мощных однофазных и трехфазных автотрансформаторов	48
1. Расчетная мощность автотрансформатора	—
2. Определение токов автотрансформатора	49
3. Определение токов отдельных частей обмотки автотрансформатора	51

	Стр.
4. Выбор индукции в стержне сердечника автотрансформатора	52
5. Выбор плотности тока в проводах обмотки автотрансформатора	—
6. Определение поперечного сечения стержня и ярма сердечника автотрансформатора	53
7. Определение числа витков обмотки автотрансформатора . .	—
8. Определение сечения и диаметра проводов обмотки	54
9. Выбор изоляции проводов обмотки	—
10. Определение высоты и ширины окна сердечника, укладка обмотки на стержнях его и уточнение размеров окна сердечника автотрансформатора	—
11. Вес меди обмотки автотрансформатора	55
12. Потери в меди обмотки автотрансформатора	—
13. Вес стали и потери в сердечнике автотрансформатора . . .	56
14. Определение тока холостого хода автотрансформатора . .	—
15. Коэффициент полезного действия автотрансформатора . .	—
16. Изменение напряжения автотрансформатора при нагрузке	57
17. Проверка автотрансформатора на нагревание	58
III. Пример расчета малоомощного однофазного автотрансформатора с секционированной обмоткой	—

Глава третья. Пиковые трансформаторы 67

I. Общие замечания	—
II. Расчет пиковых трансформаторов	73
1. Типы пиковых трансформаторов	74
2. Определение поперечного сечения вторичного стержня трансформатора	75
3. Определение числа витков вторичной обмотки	76
4. Определение сечения и диаметра провода вторичной обмотки и длины вторичного стержня	—
5. Определение поперечного сечения главного стержня . . .	77
6. Определение числа витков первичной обмотки	79
7. Определение сечения и диаметра провода первичной обмотки и размещение ее на главных стержнях	—
8. Определение размеров магнитных шунтов нерегулируемых трансформаторов	82
9. Определение числа витков, диаметра провода и размещение на главном стержне регулировочной обмотки регулируемых трансформаторов	83
10. Определение размеров магнитных шунтов регулируемых трансформаторов	85
11. Построение пиковой кривой вторичного напряжения во времени при холостом ходе	86
12. Средние длины витков обмоток трансформатора	90
13. Вес меди и активные сопротивления обмоток	—
14. Потери в меди обмоток при 75° С	91
15. Вес стали сердечника трансформатора	—
16. Потери в стали сердечника	92
17. Определение тока холостого хода трансформатора	94
18. Проверка трансформатора на нагревание	—
III. Пример расчета регулируемого пикового трансформатора	95

	Стр.
Глава четвертая. Импульсные трансформаторы	107
I. Общие замечания	—
II. Расчет импульсных трансформаторов	111
1. Определение средней мощности и токов трансформатора	112
2. Типы импульсных трансформаторов	113
3. Выбор приращения индукции и толщины листов материала сердечника	115
4. Определение поперечного сечения стержня и средней длины магнитопровода сердечника трансформатора	116
5. Определение числа витков обмоток трансформатора	117
6. Определение сечения и диаметра проводов обмоток	—
7. Укладка обмоток и уточнение размеров окна сердечника трансформатора	118
8. Средние длины витков обмоток трансформатора	121
9. Вес меди и активные сопротивления обмоток	122
10. Потери в меди обмоток	—
11. Вес стали сердечника трансформатора	—
12. Потери в стали сердечника	123
13. Коэффициент полезного действия трансформатора	—
14. Намагничивающий ток трансформатора	—
15. Параметры импульсного трансформатора и проверка искажения трансформируемого импульса напряжения	124
16. Проверка трансформатора на нагревание	121
III. Пример расчета импульсного трансформатора	126
Приложения	133
Литература	141

Цена 4 р.